

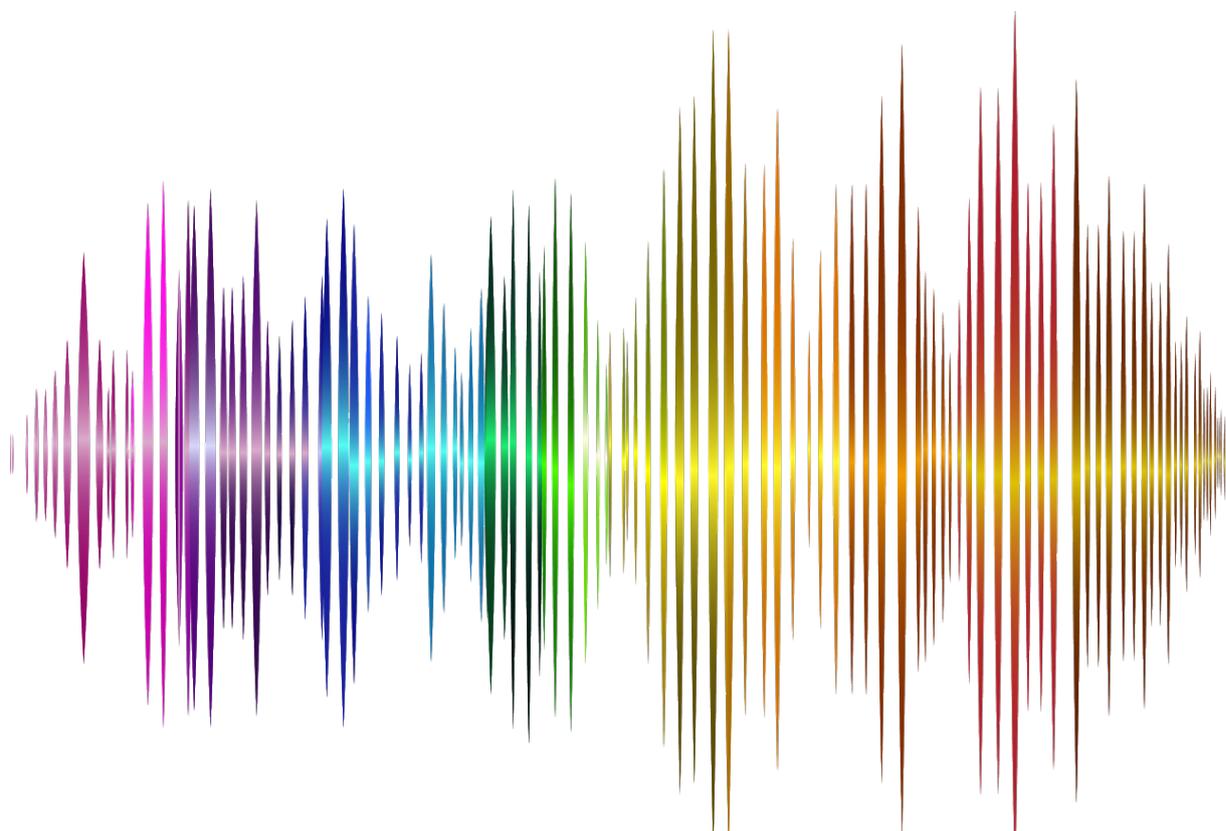
# **Техническая акустика:**

## **разработки, проблемы, перспективы**

---

---

**Материалы международной  
научной конференции  
25-28 мая 2021 года, г. Витебск**



**Витебск**

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ  
ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА: РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Материалы международной  
научной конференции**

(Витебск, 25-28 мая 2021 года)

Витебск  
УО «ВГТУ»  
2021

УДК 534  
ББК 32.87

Под редакцией члена-корреспондента НАН Беларуси В.В.Рубаника

**Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы:** материалы международной научной конференции, Витебск, 25-28 мая 2021 г./ под. ред. чл.-корр. Рубаника В.В. – Витебск: УО «ВГТУ», 2021. – 146 с.

ISBN 978-985-481-678-4

В сборнике представлены результаты исследований по влиянию ультразвуковых колебаний на процессы деформации, дефектную структуру и свойства нано – и микрокристаллических металлов и сплавов, композитов, материалов с эффектом памяти формы и др.; физических основ ультразвуковых технологий и применения ультразвука для интенсификации технологических процессов; по ультразвуковым методам неразрушающего контроля материалов.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов – научных работников, инженеров, работающих в области технической акустики, ультразвуковых технологий, материаловедения функциональных материалов, а также преподавателей, аспирантов и студентов физических, технических специальностей.

Материалы докладов печатаются в виде, представленном авторами.

**УДК 534  
ББК 32.87**

ISBN 978-985-481-678-4

© ИТА НАН Беларуси, 2021  
© УО «ВГТУ», 2021

Уважаемые коллеги!

Благодарим Вас за проявленный интерес и активное участие в Международной научной конференции «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы...», которая в этот раз прошла в дистанционном формате. К сожалению, эпидемиологическая ситуация не позволила провести конференцию в обычном, привычном для нас «традиционном» режиме. Несмотря на это, конференция предоставила возможность ученым и исследователям обменяться опытом и результатами последних достижений в области технической акустики, ультразвуковых исследований, обсудить новые научные направления и установить научные и деловые связи между учеными, расширить и укрепить международное сотрудничество.

Необходимо отметить, что в последнее десятилетие наблюдается быстрый рост числа исследовательских центров, работающих в области ультразвука, это связано с тем, что результаты исследований актуальны и находят широкое применение в различных областях науки и техники.

Конференция затронула многие актуальные вопросы, в частности:

- физические основы ультразвуковых технологий;
- применение ультразвука для интенсификации технологических процессов;
- влияние ультразвуковых колебаний на структуру и свойства металлов и сплавов: аморфных, композитов, материалов с эффектом памяти формы и др.;
- ультразвуковые методы неразрушающего контроля материалов;
- ультразвуковое технологическое оборудование.

Инициатором и организатором проведения конференции выступил Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, коллектив которого имеет ряд научных достижений как в области фундаментальных исследований – ультразвуковое инициирование эффектов мартенситной неупругости, саморасширяющийся высокотемпературный синтез и др., так и прикладных – ультразвуковая сварка, очистка, механоактивация, прессование, проектирование и изготовление ультразвукового оборудования и др.

В конференции приняли участие ученые и специалисты из России, Украины, Китая, Италии, Болгарии, Вьетнама, Португалии и других стран.

Уверены, что идеи и решения, которые прозвучали в ходе конференции, дадут импульс новым исследованиям и проектам в этой области. Надеемся, что работа конференции была продуктивной и открыла новые возможности для взаимовыгодного сотрудничества.



Председатель  
организационного  
комитета конференции,  
член-корр. НАН Беларуси,  
доктор технических наук

В.В. Рубаник



Председатель  
программного комитета  
конференции,  
академик НАН Беларуси,  
доктор технических наук

В.В. Клубович



Председатель  
локального комитета  
конференции,  
доктор технических наук

В.В. Рубаник мл.

Dear participants,

Thank you for your interest and active participation in the International Scientific Conference "Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects", which this time was held virtually. The epidemiological situation caused by COVID-19 changed the traditional face-to-face format of our conference. Despite this, the conference provided opportunities for scientists and researchers to exchange experience and the results of the latest achievements in the field of technical acoustics, ultrasound research, discuss new scientific directions and establish close scientific and business relations between scientists, expand and strengthen international cooperation.

It should be noted that in the last decade there has also been a rapid increase in the number of research centers working in the field of ultrasound. This is due to the fact that the research results are relevant and find applications in different fields of science and technology.

The conference touched upon many topical issues, in particular:

- the physical foundations of ultrasonic technologies;
- the application of ultrasound for the intensification of technological processes;
- the influence of ultrasonic vibrations on the structure and properties of metals and alloys: amorphous, composites, shape memory materials, etc.;
- the ultrasonic methods of non-destructive testing of materials;
- the ultrasonic processing equipment.

The Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus was the initiator and organizer of the conference. The research groups of the Institute have a number of scientific achievements in both in the field of fundamental research - ultrasonic initiation of the effects of martensitic inelasticity, self-propagating high-temperature synthesis of materials, etc., and applied - ultrasonic welding, cleaning, mechanical activation, pressing, design and manufacture of ultrasonic equipment, etc.

The conference was attended by scientists and specialists from Russia, Ukraine, China, Italy, Bulgaria, Vietnam, Portugal and other countries.

We are sure that the ideas and solutions that were voiced during the conference will give impetus to new research and projects in this area. We hope that the conference was productive and opened up new opportunities for mutually beneficial cooperation.

Thank you again for your participation!

The Conference Organizing Committee  
25-28 May, 2021  
Vitebsk, Belarus

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ**

**Белоцерковский М.А.<sup>1</sup>, Белявин К.Е.<sup>2</sup>, Сосновский И.А.<sup>1</sup>, Курилёнок А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,*

*Минск, Республика Беларусь, sos3@tut.by*

<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет,*

*Минск, Республика Беларусь, dz-m@tut.by*

Технологические схемы нагрева, применяемые в процессах центробежной индукционной наплавки (ЦИН) [1], должны обеспечивать равномерное распределение температуры по всей термически обрабатываемой поверхности заготовки и получение осесимметричных температурных полей в любом ее сечении. Для управления качеством индукционного нагрева путем достижения равномерности температурного поля во всех сечениях по длине заготовки с наносимым покрытием имеется несколько каналов. Все эти каналы управления связаны с изменением подводимой к детали мощности, но отличаются способом реализации. Один из каналов управления температурным полем связан с изменением подводимой мощности (или напряжения) на входе, т.е. к шинам индуктора, а все остальные – путем ее изменения на выходе, т.е. регулированием мощности, передаваемой от индуктора в деталь. Осуществление нагрева с использованием двух и более каналов обеспечивает пространственное управление, отличающееся ускоренным установлением стабильности температурного поля по глубине и длине заготовки. Однако исполнение любых технологических схем нагрева требует обеспечения заданного режима нагрева и контроля за его исполнением.

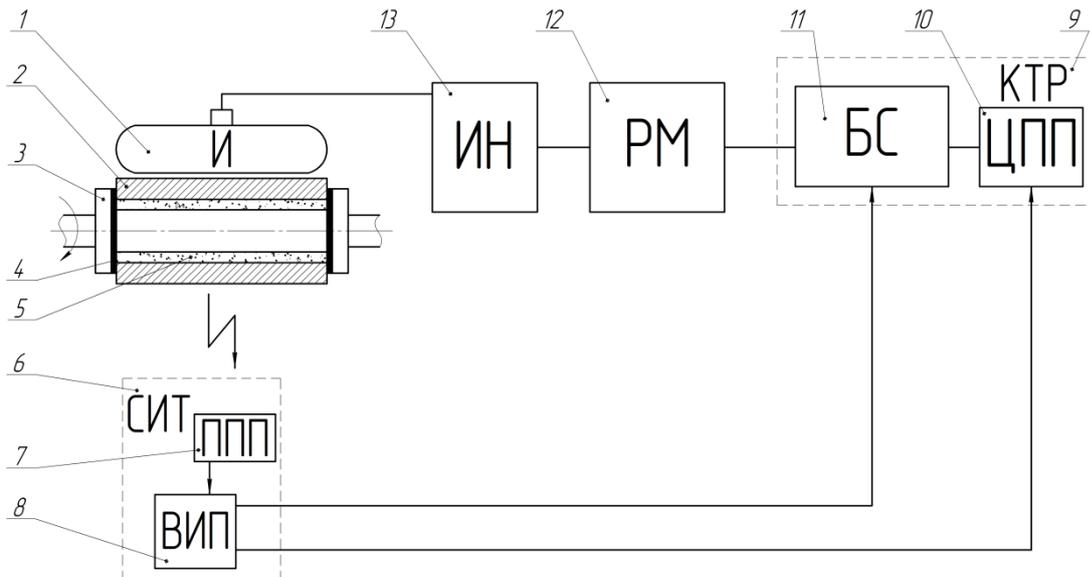
Недостатками известных систем контроля и управления технологическими режимами нагрева в процессе ЦИН является невозможность обеспечения управления нестационарными температурными режимами индукционного нагрева, что приводит к снижению качества получаемых изделий с покрытиями.

Целью настоящей работы являлось создание системы оптимального управления нестационарными температурными режимами индукционного нагрева в процессе ЦИН для повышения качества изготавливаемых изделий, так как структура и физико-механические свойства покрытий существенно зависят от режимов нагрева.

Система оптимального управления нестационарными температурными режимами в процессе ЦИН состоит из следующих составных частей (блоков) (см. рисунок 1):

- 1) индуктор И;
- 2) система измерения температуры СИТ, состоящая из первичного пирометрического преобразователя ППП и вторичного измерительного преобразователя ВИП;
- 3) контроллер температурных режимов, состоящий из цифрового преобразователя программатора ЦПП и блока согласования БС;
- 4) регулятор мощности РМ;
- 5) источник нагрева ИН;
- 6) обрабатываемая деталь.

Снабжение системы управления контроллером температурных режимов КТР и блоком согласования БС позволяет обеспечить оптимальное управление нестационарными температурными режимами индукционного нагрева для получения покрытий с высокими физико-механическими характеристиками и, как следствие, повысить качество изготавливаемых изделий. При этом соединение контроллера температурных режимов КТР и блока согласования БС между собой, а контроллера температурных режимов КТР с системой измерения температуры СИТ, позволяет получать исходные данные для расчета параметров оптимального режима нагрева. Соединение блока согласования БС с регулятором мощности РМ источника нагрева ИН обеспечивает преобразование параметров оптимального режима нагрева в приемлемую форму сигнала для управления мощностью источника нагрева ИН.



1 – индуктор И; 2 – заготовка; 3 – зажимные центры; 4 – антипригарные прокладки; 5 – наплавляемая порошковая шихта; 6 – система измерения температуры СИТ; 7 – первичный пирометрический преобразователь ППП; 8 – вторичный измерительный преобразователь ВИП; 9 – контроллер температурных режимов КТР; 10 – цифровой преобразователь программатора ЦПП; 11 – блок согласования БС; 12 – регулятор мощности РМ; 13 – источник нагрева ИН

Рисунок 1 – Схема системы оптимального управления нестационарными температурными режимами в процессе центробежной индукционной наплавки

Оптимальное управление нагревом обрабатываемой детали, на внутреннюю поверхность которой наносят покрытие, осуществляется следующим образом. На контроллер температурных режимов КТР поступают сигналы напряжения обратной связи, соответствующие температуре обрабатываемой детали со вторичного измерительного преобразователя ВИП системы измерения температуры СИТ. Контроллер температурных режимов КТР обрабатывает полученные сигналы, сравнивает их с заранее заданными значениями функции оптимального управления температурным режимом и выдает оптимальный сигнал управления на вход блока согласования БС, который преобразует полученный сигнал в сигнал входной формы регулятора мощности РМ источника нагрева ИН. Регулятор мощности РМ управляет работой источника нагрева ИН (генератора токов высокой частоты) и подает мощность на индуктор И, нагревающему обрабатываемую деталь. После завершения процесса формирования покрытия центробежным методом отключают источник нагрева ИН (генератор токов высокой частоты) и охлаждают наплавленную деталь до кристаллизации покрытия, после чего отключают вращение. Затем наплавленную деталь с покрытием снимают с зажимных центров и охлаждают до комнатной температуры в статическом состоянии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белявин, К. Е. Инженерные методы расчета температурно-временных параметров в процессах центробежной индукционной наплавки покрытий / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. А. Курилёнок // Перспективные материалы и технологии : монография. В 2-х т. Т. 2 / под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – Гл. 1. – С. 5–18.

**К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ КОМПОНЕНТОВ ЭНЕРГОЕМКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ И ДРУГИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ. СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**Ефремовцев Н.Н.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук», г. Москва, Россия  
noee7@mail.ru*

**Аннотация.** *Приведены основные результаты исследований влияния физических полей и в том числе УЗ обработки на дефектность кристаллической структуры аммиачной селитры. Рассмотрены методологические вопросы систематизации и численной оценки синергетических эффектов комбинированных воздействий физическими полями на структуру компонентов энергоемких материалов.*

Целью исследований является поиск дополнительных возможностей повышения полноты и устойчивости детонации зарядов малого диаметра, используемых при разработке полезных ископаемых. Влияние дефектов на характеристики взрывчатых материалов (ВМ) от дефектов рассмотрены в работах Баума А.Ф., Станюкевича К.П., Бодуна Ф.П., Дубнова Л.В., Сухих В.А. [1,2]. Скопления дефектов кристаллической решетки компонентов конденсированных взрывчатых материалов (ВМ) обладают значительным потенциалом энергии, выполняют роль горячих точек детонации и оказывают влияние на чувствительность ВМ.

С использованием методологии системного анализа автором с 2002 г. проводятся исследования влияния магнитно-импульсного (МИО), акустического и СВЧ-воздействий на кристаллическую структуру аммиачной селитры (АС). Для комплексных исследований применяется рентгенографический метод, оптическая и электронная, инфракрасная, ультразвуковая и романовская микроскопии, а также методы полигонных испытаний ВМ [3]. В результате проведенных исследований с применением методов рентгенографического и электронно-графического анализа установлено, что для всех исследованных способов воздействия физическими полями на структуру АС характерно наличие режимов обработки, обеспечивающих снижение размера элементарного блока кристаллической структуры и нелинейное изменение плотности дислокаций с увеличением нагрузки (см. рис. 1). Проведены исследования влияния УЗ обработки и ПАВ на дисперсный состав эмульсии и порошкообразной энергетической добавки, кинетику удерживающей и впитывающей способности гранулированной АС. Применение поверхностно активных веществ (ПАВ) в составе топливных смесей усиливает эффект изменения морфологии АС и кинетики потери массы при термическом разложении.

Полигонные испытания методом подводного взрыва на полигоне ИПХФ РАН в г. Черноголовке [4,5] и объектах ООО «Взрывстой» показали, что скорость и полнота детонации, давление во фронте ударной подводной волны и работоспособность составов гранулитов и инновационных топливных смесей зависят от режима обработки МИО и наличия ПАВ. Что свидетельствует о синергетическом характере физико-химических воздействий физических полей и ПАВ на кристаллическую структуру АС и взрывчатые характеристики ПВВ.

В результате проведенных исследований установлено, что максимальный синергетический эффект на изменение размера блока мозаичной структуры и дефектность плотной АС ГОСТ 2-85 марки А оказывает комбинированная обработка магнитным полем низкой частоты и высокочастотным электрическим полем с высокой амплитудой. При этом индекс синергетического эффекта составил 154 % [5]. Численные значения индекса синергетического эффекта комбинированного воздействия предлагается определять по формуле:

$$K_{сэ} = \left[ \frac{K_{аэ} \cdot 100}{(K_a + K_б)} \right] - 100,$$

где  $K_{сэ}$  – индекс изменения (прироста или снижения) синергетического эффекта комбинированного воздействия полями сложной пространственно-временной структуры, % ;  $K_{аэ}$  – индексы изменения в процентах от базовых показателей параметра кристаллической решетки в результате совместного воздействия режимов обработки А и В, % ;  $K_a$  и  $K_б$  – индексы изменения показателя (в данном случае – размера блока) при использовании режима обработки А и Б в % относительно базового значения блока АС.

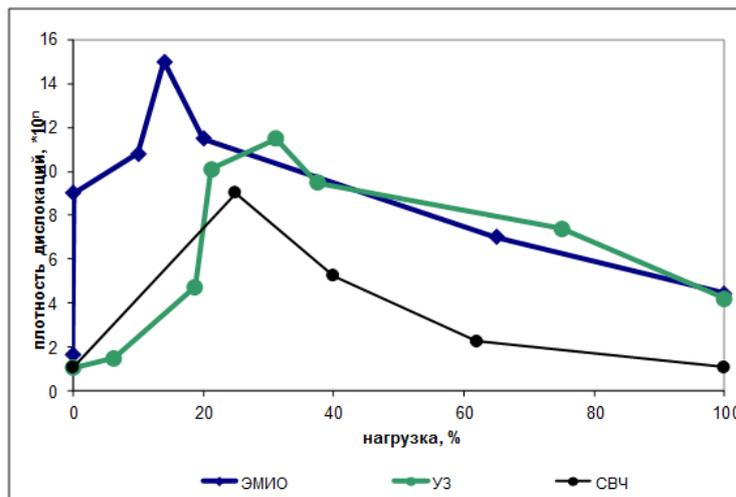


Рисунок 1 – Характер изменения плотности дислокаций АС при изменении режимов интенсивной электромагнитной обработки (ЭМИО), воздействия ультразвуком (УЗ) и СВЧ-обработки

Изучение результатов комбинированных физико-химических воздействий на кристаллическую структуру компонентов ПВВ и физико-механические свойства горных пород показало необходимость корректировки зависимостей для расчета критических напряжений, полученных Гриффитсом и Олованом для случая плоского деформированного состояния и с учетом пластической деформации критического напряжения [4]:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E_{упр} \cdot K_p}{\pi \cdot L \cdot (1 - V^2)}}, \quad \sigma_k = K_{сэ} \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot K_p \cdot (\gamma + \gamma_p)}{\pi \cdot L}},$$

где  $E_{упр}$  – модуль Юнга, Па;  $L$  – критическая длина трещины;  $V$  – коэффициент Пуассона;  $K_p$  и  $K_{сэ}$  – коэффициенты, учитывающие адсорбционное понижение прочности (эффект Ребиндера) при воздействии поверхностно-активных веществ и синергетические эффекты комбинированных воздействий физических полей на кристаллическую структуру, доли ед.;  $\gamma_p$  – работа пластической деформации, Дж/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – удельная энергия образования новой поверхности, Дж/м<sup>2</sup>.

На основе результатов исследований проводится работа по систематизации методов управления взрывом с учетом синергетических эффектов комбинированных воздействий на разных масштабных уровнях. Предлагаемая классификация учитывает физическую сущность изменений структуры

материалов, типы, процессы и результаты физико-химического воздействий (ФХВ) и их комбинаций на компоненты средств разрушения горных пород. К ФХВ относятся: механическое, магнитно-импульсное, акустическое, СВЧ, гидравлическое (в том числе с применением ПАВ), химическое, термическое, радиационное.

Промышленные испытания в производственных условиях показали, что применение разработанного состава нано- и микродисперсной топливной смеси, обеспечивает оперативное изменение морфологии АС, формирование горячих центров детонации на различных масштабных уровнях, увеличение площади контакта топлива и окислителя непосредственно в процессе смешения компонентов, а также смещение кислородного баланса взрывчатой смеси в положительную сторону. В результате значительно увеличивается работоспособность ПВВ по воронке выброса, полная работа подводного взрыва зарядов малого диаметра, интенсивность дробления, а также скорость детонации на 500–700 м/с в скважинах 115 мм. В рамках выполнения программы работ гранта, полученного автором в инновационном центре Сколково для организации промышленного производства нано и микродисперсных эмульсий топливных смесей ООО «ТехНаНова», построен цех в г. Дзержинске.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Баум, А. Ф., Станюкевич, К. П., Шестер, Б. И. Физика Взрыва. – М. : Физматгиз, 1959.
2. Дубнов, Л. В., Сухих, В. А. О связи несовершенств кристаллической решетки с возбудимостью твердых тел взрывчатых веществ при механическом воздействии // Взрывное дело: М. : «Недра», 1973. – С. 191–198.
3. Ефремовцев, Н. Н., Ефремовцев, П. Н. К вопросу использования физических полей для управления взрывчатыми характеристиками промышленных взрывчатых полей // Физические проблемы разрушения горных пород; Сб. тр. Четвертой международной научной конференции, 18-22 октября 2004 г. – С. 342–345.
4. Ефремовцев, Н. Н., Ефремовцев, П. Н. К вопросу управления структурой аммиачной селитры на различных масштабных уровнях для повышения эффективности действия взрыва // Взрывное дело, № 129/86. – С. 178–187.
5. Ефремовцев, Н. Н. Вопросы систематизации синергетических эффектов на различных масштабных уровнях для повышения эффективности действия взрыва. Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. 4 Конференция международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого, 16–20 ноября 2020 г. Труды конференции. – Москва. – С. 79–81.

## APPROACHES TO INCREASING THE EFFICIENCY OF ULTRASONIC DRILLING OF EXTRATERRESTRIAL OBJECTS SOIL

**Khmelev V.N.<sup>1</sup>, Golykh R.N.<sup>1</sup>, Quan Qiquan<sup>2</sup>, Barsukov R.V.<sup>1</sup>, Genne D.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Biysk Technological Institute (branch) of AltSTU, Biysk city, Russian Federation, romangl90@gmail.com*

<sup>2</sup>*Harbin Institute of Technology, Harbin, China*

Ultrasound (US) drilling soil is able to solve a number of difficult challenges of the development of extraterrestrial objects [1–3]. Preliminary laboratory studies including studies performed by the authors of the report revealed that ultrasonic drilling can potentially eliminate even those problems that cannot be solved by alternative physical influences:

– insufficiently high speed of soil sampling during mechanical drilling using a rotating tool;

– heating of solid rock during mechanical drilling. The heating leads to the evaporation of traces of water and other valuable substances, which makes it possible to obtain information about the presence in the past or present of traces of life on the object and determine the possibility of further colonization of an extraterrestrial object;

– lack of reliable anchoring of the lander on the surface of an object with low gravity (for example, an asteroid);

– lack of a way to determine the type of soil to determine its properties at different depths in real time, in order to obtain information about the evolution and origin of an extraterrestrial object.

The use of ultrasonic vibrations in the drilling process reduces the temperature to which the soil is heated, increases the drilling speed compared to mechanical impact (taking more soil per unit of time or providing a higher reliability of fixing the landing module). The control of the acoustic load, which affects the working tool performing ultrasonic vibrations, will make it possible to indirectly evaluate the type and properties of the soil.

However, despite the enormous potential and many advantages, ultrasonic drilling of extraterrestrial objects is still at the stage of laboratory research [3, 4], although interest in ultrasonic drilling of hard and brittle materials arose back in the 50s of the XXth century (Kitaygorodsky Yu.I. , Galperina A.N., Kikuchi E., Merkulova L.G., A.A. Gorbunov). This is due to the fact that the installing and use of ultrasonic drilling systems on interplanetary landing modules requires solving a number of problems. The main one is the need to ensure the minimum energy consumption of the process (efficiency), i.e. per unit of ultrasonic energy expended, drill the soil to the maximum possible depth or preserve the maximum possible amount of water and other valuable substances (the specific criterion of efficiency depends on the purpose of ultrasonic drilling).

Providing the maximum efficiency of ultrasonic drilling per unit of consumed energy is a critical task, because the energy resources of the interplanetary lander are limited due to long-term autonomous operation (up to several months).

The authors proposed the following directions for reducing the energy consumption of the drilling process:

– the imposition of an additional low-frequency (shock) impact in order to form enlarged microcracks in the soil. Due to this, high-frequency (ultrasonic exposure) will destroy the soil more efficiently;

– the imposition of a pseudo-rotational movement to avoid compaction of drilling waste near the working end of the tool;

– optimization of the frequency and amplitude of vibrations by the method of phenomenological modeling of soil destruction and water evaporation.

To implement additional low-frequency (shock) impact and pseudo-rotational movement, the authors proposed an ultrasonic drill design, protected by the patent of Russian Federation [5].

The laboratory tests of the sample (table 1) made it possible to establish that the use of a combined action (ultrasound (US) + low-frequency action (LF) + pseudo-rotational motion (PR)) provides the maximum drilling speed of the soil simulator in the wide range of

pressing forces (from 5 N, which no more than 3 times the force of gravity acting on an ultrasonic drill on the Moon, up to 20 N— almost two earthly gravity).

With low pressing forces (5 N), which are implemented on space bodies with low gravity, the combination of US + LF + PR gives an almost 2-fold increase in the drilling speed in comparison with the classical US influence.

Table 1 – The results of studies of the effectiveness of ultrasonic drilling of a simulator of lunar soil

Pressing force, N	Drilling speed, mm/min				
	PR	US	US+PR	US+LF	Y3+LF+PR
20	11	122	134	136	154
10	10	91	102	100	136
5	5	55	59	60	102

To further increase the drilling efficiency, a comprehensive optimization of the ultrasonic drilling modes was performed in terms of the frequency and amplitude of oscillations. Since conducting experimental studies at different frequencies and amplitudes is laborious and costly (for each new vibration frequency it is necessary to make a new ultrasonic drill), a phenomenological model of the drilling process has been developed.

The model made it possible to reveal the dependence of the drilling speed on the frequency and amplitude of vibrations (Figures 1, 2). For each pressing force, the presence of limiting amplitude is established at which a further increase in the drilling speed does not occur. The presence of optimal exposure frequencies has been evaluated.

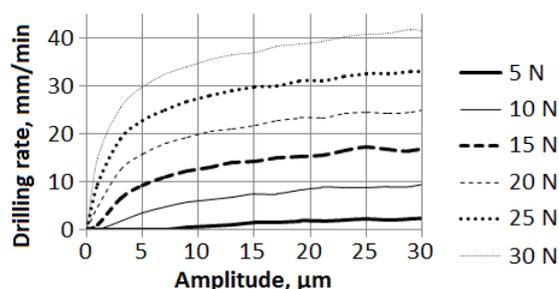


Figure 1 – Dependences of the drilling speed on the amplitude of ultrasonic action at different pressing forces on sample (in N; Frequency is 23 kHz)

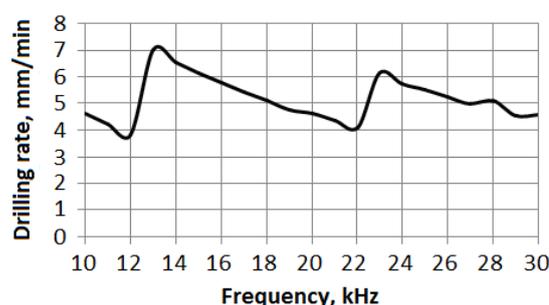


Figure 2 – Dependences of the drilling speed on the frequency of ultrasonic action (amplitude is 10 μm)

To determine the modes providing the maximum safety of traces of water and ice, the thermodynamic model of evaporation was created, which made it possible to evaluate the optimal amplitudes that provide the minimization of moisture evaporation from a unit mass of the sampled soil.

Experimental studies on the indirect determination of the amount of evaporated water (by measuring the temperature dependences on time at different depths of the soil simulator) made it possible to evaluate that the theoretical results obtained do not contradict the experimental data.

The proposed approaches to increasing the efficiency of ultrasonic drilling in the future will form the basis for the creation of ultrasonic drilling devices suitable for use as part of flight samples of landing modules.

The reported study was supported by RFBR and NSFC in the frames of the scientific project No. 21-52-53036.

REFERENCES

1. Cohen, Y. B. Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) as a Sampler for Planetary Exploration / Y.B. Cohen, S. Sherrit, B. P. Dolgin, N. Bridges, X. Bao, Z. Chang, A. Yen, R. S. Saunders, D. Pal, J. Kroh, T. Peterson // 2001 IEEE Aerospace Conference on the topic of "Missions, Systems, and Instruments for In Situ Sensing". – 11 p.
2. Bai, D. A longitudinal & longitudinal-torsional vibration actuator for rotary-percussive ultrasonic planetary drills / D. Bai, Q. Quan, Y. Wang, D. Tang, Z. Deng // Advances in Space Research. – 2019. – Vol. 63(2). – P. 1065–1072.
3. Matveev, Yu. I. Experimental studies of experimental ultrasonic penetration device on model media imitating the Moon regolith / Yu. I. Matveev, V. I. Kostenko, V. N. Khmelev, D. V. Genne // South-Siberian Scientific Bulletin. – 2018. – No. 1. – P. 42–49.
4. Li, H. A Piezoelectric-Driven Rock-Drilling Device for Extraterrestrial Subsurface Exploration / H. Li, Y. Shen, Q. Wang, Y. Wang, D. Bai, Z. Deng // Shock and Vibration. – 2018. – 12 p.
5. Barsukov, R. V. Ultrasonic Drilling Device for Extraterrestrial Objects / R. V. Barsukov, D. V. Genne, V. A. Nesterov, V. N. Khmelev. – Patent of Russian Federation 2726495 C1, 14.07.2020. Application No. 2019143844 since 23.12.2019.

## **ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОТОЧНЫХ РЕАКТОРАХ**

**Федулов И.С.<sup>1,2</sup>, Систер В.Г.<sup>2</sup>, Абрамов В.О.<sup>1</sup>, Абрамова А.В.<sup>1</sup>, Никонов, Р.В.<sup>1</sup>,  
Баязитов В.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей неорганической химии имени Н. С. Курнакова Российской Академии Наук»,  
Москва, Россия, info@igic.ras.ru*

<sup>2</sup>*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»,  
Москва, Россия, mospolytech@mospolytech.ru*

Процесс очистки сточных вод зачастую подразумевает непрерывную обработку больших объёмов. Техническим решением, которое позволяет проводить данный процесс, является применение систем с проточными реакторами, где сточные воды поступают из бака накопителя или, при достаточной производительности, напрямую в рабочую зону. Проточные реакторы, в свою очередь, основываются на различных принципах работы: химические (по типу реакторов смешения, где обрабатываемый материал смешивается с химическим реагентом, вступает в реакцию, и выпадает улавливаемый осадок или захватывается образующийся газ), физические (начиная с фильтров с циклами самостоятельной очистки и заканчивая применением электромагнитного излучения), биологические (в ряде случаев вполне рационально использовать биореакторы с активным илом или другими носителями для активной среды). Данные способы достаточно изучены и широко применяются в различных сферах промышленности и бытового использования. Тем не менее одним из трендов современной технологии очистки сточных вод стали различные комбинации базовых принципов работы, с получением новых явлений, на основе которых строятся реакторы нового поколения. Основной положительной чертой таких конструкций является взаимоисключение технических проблем, присутствующих при использовании только одного из принципов. Такой подход также позволяет проектировать установки многофункционального назначения вместо узконаправленного оборудования.

Одним из перспективных способов очистки сточных вод стал относительно недавно разработанный метод, получивший название «холодная плазма». Основная идея данного способа заключается в образовании локального пробоя, вокруг которого создаётся зона плазмы (стример). Такое название данный способ получил из-за того, что даже несмотря на высокие температуры и давление в местах пробоя, омывающий поток жидкости распределяет всё выработанное тепло и энергию по объёму, из-за чего температура обработанной жидкости на выходе из установки увеличивается не более чем на 1–10 С°, в зависимости от производительности реактора. Данный способ основывается на физико-химическом принципе и включает в себя несколько механизмов воздействия на загрязнители, такие как микроударное воздействие, ультрафиолетовое излучение, высвобождение свободных радикалов и разрушение сложных веществ в результате воздействия электрического тока.

Однако данный метод имеет и недостаток: образование стримера сильно зависит от расстояния между образующими разряд электродами. Различные наработки в данной области показали, что область горения плазмы в реакторе имеет весьма малую длину, в противном случае процесс протекать не может. Кроме этого, стример получается в разных точках, из-за чего присутствует достаточно большая вероятность возникновения необработанных участков (мёртвые зоны). Другими словами, процесс протекает нестабильно.

Рассматривались различные способы решения данной проблемы (вихревой поток, перпендикулярное расположение электродов и т.д.), однако одним из наиболее удачных оказалось использование акустических колебаний, возникающих в гидродинамическом излучателе. Основной идеей вспомогательного воздействия на технологический процесс стало создание такой среды, в которой были бы благоприятные условия для пробоя. Гидродинамический излучатель создаёт

непрерывный турбулентный поток за счёт столкновения жидкости с его рабочими поверхностями и активного перемешивания в объёме. Возникающие вторичные процессы кавитации и пульсации являются ключевым звеном в получении необходимой среды. Таким образом, на выходе из излучателя образуется своеобразный факел из мелких пузырьков, который является идеальным проводником для проведения процесса. Более того, распределение разряда по объёму реактора способствует не только гомогенизации материала, но и покрытию мёртвых зон, присутствующих при обычном исполнении. Полученное явление было названо «соноплазма».



Рисунок 1 – Экспериментальный реактор

Последующее изучение явления показало, что немаловажную роль в процессе образования играет образующийся перепад давления на выходе из излучателя. Чем выше степень разряжения, которое образуется на выходе из излучателя, тем легче возникает пробой. Длина факела из пузырьков также зависит от давления подаваемой жидкости в излучатель. В итоге, общая длина зоны горения плазмы составила около 200 мм, что значительно повысило время обработки и позволило достичь высокой эффективности очистки. Позже было также обнаружено, что проведение процесса возможно практически по всей длине факела пузырьков. Увеличить зону горения можно путём введения дополнительного «горячего» электрода и разделения высоковольтной части на два работающих синхронно блока. Таким образом, удалось увеличить зону горения вплоть до 350 мм.

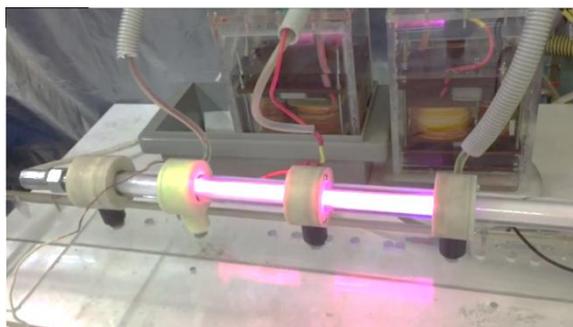


Рисунок 2 – Экспериментальный реактор с двумя зонами горения

При масштабном переходе отклонений также не наблюдалось, однако было отмечено, что увеличение производительности установки уменьшает общий нагрев обрабатываемой жидкости (эффект объясняется увеличением теплопереноса за счёт увеличения общей массы) до 1–2 С°.

Обобщая вышеизложенные данные, можно прийти к заключению, что применение акустических колебаний, образующихся в гидродинамическом излучателе при прохождении через него потока жидкости, благоприятно воздействует на процесс образования плазмы, позволяя создавать равномерную зону обработки материала

практически по всей длине проточного реактора. Данную технологию можно применять для разработки проточных реакторов, основанных на принципе холодной плазмы, тем самым значительно расширяя их возможности. Применение технологии на практике хоть и требует дополнительных исследований для конкретных случаев, однако проведённые предварительные испытания на модельных загрязнителях показывают высокую эффективность очистки от микробиологических и химических загрязнений. В качестве моделей загрязнителей рассматривалось: загрязнение органическими веществами (метиловый спирт), микробиологическое загрязнение (суспензия *Escherichia coli*) и загрязнение нефтепродуктами. Во всех случаях после обработки наблюдалось значительное снижение концентрации. На основе полученных данных был спроектирован и построен промышленный образец установки по обработке сточных вод для медицинских учреждений.



Рисунок 3 – Промышленный образец установки для очистки стоков медицинских учреждений

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Илюшина, В. В. Современные методы очистки сточных вод // Современная техника и технологии, 2017, № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2017/02/12446>. – Дата обращения: 11.09.2020.
2. Vladimir O. Abramov, Anna V. Abramova, Giancarlo Cravotto, Roman V. Nikonov, Igor S. Fedulov, Vladimir K. Ivanov (2021): Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma In: *Ultrasonics Sonochemistry* 70 (2021), 105323.
3. J. Foster, B. S. Sommers, S. Nowak Gucker, I. M. Blankson, G. Adamovsky, Perspectives on the Interaction of Plasmas With Liquid Water for Water Purification. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. 40, NO. 5, MAY 2012.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ**

**Мухаметгалина А.А., Мурзинова М.А., Назаров А.А.**  
*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,  
Уфа, Россия  
a.mukhametgalina@mail.ru*

### **Введение**

Ультразвуковая сварка металлов (УЗС) – это метод сварки, при котором соединение тонких деталей происходит при одновременном воздействии высокочастотных знакопеременных механических колебаний и статической силы сжатия. УЗС применяют в микроэлектронике, приборостроении, автомобилестроении, а также в других видах промышленности для соединения тонких пластин, фольг, лент и проводов [1]. УЗС обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами сварки. Соединение металлов происходит при более низких температурах, чем при использовании электродуговой или газовой сварки, а также при меньших энергозатратах [2]. Нет необходимости использования инертных газов и присадочных материалов, а также тщательной предварительной очистки поверхностей. Высокая производительность является еще одним из преимуществ УЗС: можно получить соединение за 1–2 с [1].

Как показано в [3], с помощью ультразвука можно получить соединения практически любых металлов. Однако наибольший опыт накоплен при сварке пластичных металлов и сплавов на основе алюминия или меди [1–3]. Структура и свойства соединений более прочных металлов, в частности, титана и его сплавов, полученных УЗС, на сегодняшний день практически не изучены [4].

В настоящей работе приводятся результаты исследований микроструктуры и свойств соединений листов титана, полученных ультразвуковой сваркой. Работа проводилась с целью анализа влияния параметров процесса, таких как статическая сила и время сварки, на прочность и эволюцию микроструктуры сварного соединения.

### **Материалы и методика исследований**

Для исследований использовали промышленные листы технического чистого титана ВТ1-0 толщиной 0.5 мм с размером зерен около 7 мкм. Из листов вдоль направления прокатки вырезали пластины шириной 20 мм и длиной 40 мм. Сварку проводили с частотой 20 кГц и амплитудой колебаний 20 мкм. Образцы для исследований были получены при трех режимах:  $P=5$  кН,  $t=3$  с;  $P=6$  кН,  $t=3$  с;  $P=6$  кН,  $t=2$  с, где  $P$  – статическая нагрузка,  $t$  – время обработки. Для сравнения прочности проводили испытания на «срез» при комнатной температуре на машине Instron 5982 со скоростью 1 мм/мин. Микроструктуру исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMN FEG.

### **Результаты и обсуждение**

При выбранных условиях сварки были получены соединения удовлетворительного качества. Максимальное значение относительной протяженности бездефектного сварного соединения (86 %) достигается при режиме  $P=6$  кН,  $t=3$  с, а минимальное (46 %) – при  $P=6$  кН,  $t=2$  с. При сварке под нагрузкой  $P=5$  кН в течение 3 с величина относительной протяженности бездефектного соединения принимает промежуточное значение (74 %). Воздействие осциллирующих сдвиговых колебаний и статического усилия сжатия приводит к уменьшению толщины верхнего листа. Деформация сжатия образцов после УЗС достигает значений 20–35 %.

На рисунке 1 изображена типичная микроструктура сварного соединения, полученного УЗС. В центральной зоне соединений дефектов не наблюдается. При УЗС в результате комплексного воздействия высокочастотных сдвиговых колебаний и статического усилия сжатия в зоне соединения происходил локальный разогрев, и

сформировались зоны термомеханического влияния (ЗТМВ). В этой зоне наблюдается значительное увеличение размера зерен до 80 мкм.

Текстура исходного листа типична для титана, подвергнутого прокатке и последующему отжигу: базисные плоскости (0001) повернуты на 20–40° относительно плоскости листа вокруг направления прокатки (рис. 2 а). В ЗТМВ текстура качественно меняется. На прямых полюсных фигурах (ППФ) для трех основных кристаллографических направлений наблюдается несколько точечных максимумов (рис. 2 б).

В ЗТМВ при всех режимах сварки в спектрах разориентировок большеугловых границ (БУГ) появляются максимумы в окрестности углов 60 и 90° (рис. 3). Подобные изменения в микроструктуре наблюдаются в титане после  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения, когда  $\alpha$  кристаллы выделяются в  $\beta$  матрице по определенными кристаллографическим плоскостям и направлениям (ориентационное соотношение Бюргерса) [5].

На рисунке 4 представлены значения усилий разрушения при испытаниях на срез, а также моды разрушения для всех режимов сварки. Увеличение длительности УЗС от 2 до 3 с при нагрузке 6 кН привело к повышению разрушающего усилия приблизительно на 20 %. При этом мода разрушения «между листами» меняется на «отрыв сварной точки». Увеличение нагрузки при одинаковом времени УЗС незначительно влияет на прочность соединений. При режиме  $P=5$  кН,  $t=3$  с достигается промежуточное значение усилия разрушения, при этом часть образцов разрушается между листами, часть с отрывом точки. Во всех случаях отрыва точки разрушение происходит в верхнем привариваемом листе. Вероятно, на прочность и моду разрушения повлияло увеличение площади бездефектного соединения и уменьшение толщины верхнего листа.

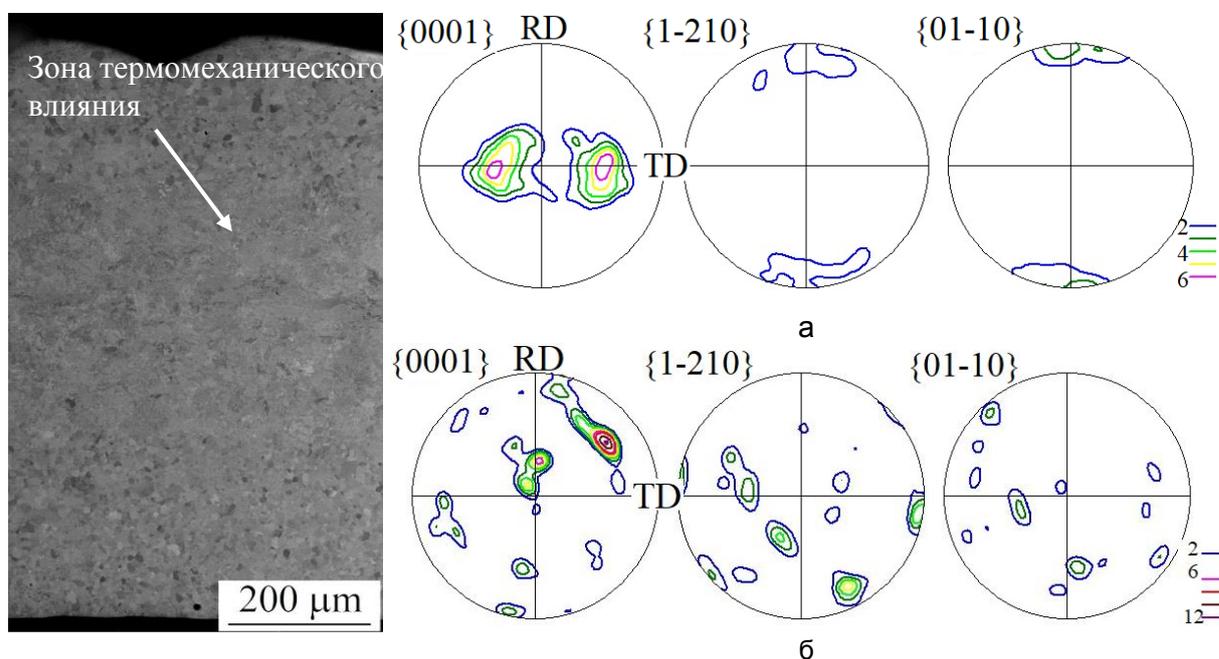


Рисунок 1 – Микроструктура образца, полученного УЗС  $P=5$  кН  $t=3$  с (BSE)

Рисунок 2 – Прямые полюсные фигуры исходного листа (а) и ЗТМВ (б) образца, полученного УЗС  $P=5$  кН,  $t=3$  с

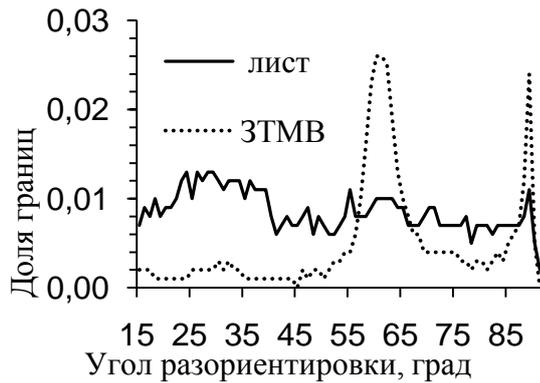


Рисунок 3 – Распределение БУГ (б) в исходном листе и в ЗТМВ образца, полученного УЗС Р=5 кН, t=3 с

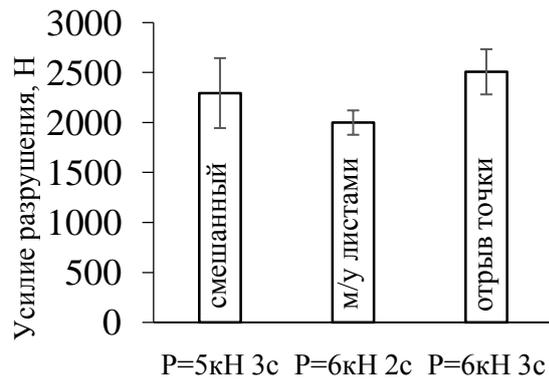


Рисунок 4 – Усилия и тип разрушения при испытаниях на срез образцов ВТ1-0

### Заключение

Таким образом, методом УЗС были получены сварные соединения титановых листов. Было показано, что увеличение статической нагрузки и времени сварки приводит к увеличению деформации сжатия и площади бездефектного соединения.

При всех рассмотренных режимах сварки в результате комплексного воздействия высокочастотных сдвиговых колебаний, статического усилия сжатия и локального разогрева формируется зона термомеханического влияния. В этой зоне наблюдается значительное увеличение размера зерен, изменения в спектре разориентировок границ зерен и кристаллографической текстуре.

По результатам испытаний на срез минимальное и максимальное усилие разрушения демонстрировали образцы, полученные УЗС при Р=6 кН в течение 2 и 3 с, соответственно. При этом мода разрушения «между листами» меняется на «отрыв сварной точки». Образцы, полученные при Р=5 кН, t=3 с, показали промежуточные значения усилий разрушения. Результаты испытаний согласуются со значениями относительной протяженности бездефектного соединения.

**Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН. Микроструктурные исследования и механические испытания проводились на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».**

### ЛИТЕРАТУРА

1. Matheny, M. P., Graff, K. F. // Ultrasonic welding of metals. – 2015, pp. 259–293.
2. Bakavos, D., Prangnell, P. B. // Mater. Sci. Eng. A. – 2010, 527, pp. 6320–6334.
3. Graff, K.F., Devine, J.F., Keltos, J., Zhou, N.Y. // Ultrasonic welding of metals. – 2007, 3, pp. 263–303.
4. Owa, T., Kondo, T., Takizawa, H. // Welding Int. – 2010, 24, pp. 182–187.
5. Gey, N., Humbert, M. // Acta Materialia. – 2002, 50, pp. 277–287.

## УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАМАНТАНА И ХЛОРАДАМАНТАНА ПРИ ПЕРЕХОДАХ ПОРЯДОК-БЕСПОРЯДОК

Данилов И.В., Громницкая Е.Л., Бражкин В.В.

Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН,

Троицк, Москва, Россия

idaniilov@hppi.troitsk.ru

Адамантан ( $C_{10}H_{16}$ ) – один из архетипических диамантоидов. В нормальных условиях адамантан кристаллизуется в ГЦК-структуру, состоящую из ориентационно неупорядоченных молекул адамантана. Однако при охлаждении до 208 К или сжатии до давления выше 0,5 ГПа эта структура трансформируется в упорядоченную объемно-центрированную тетрагональную фазу [1]. Хорошо известным гомологом адамантана является 1-хлорадамантан ( $C_{10}H_{15}Cl$ ), который представляет собой глобулярную молекулу, полученную замещением атома хлора на один атом водорода в  $C_{10}H_{16}$ . Эксперименты по рентгеновской дифракции и диэлектрической релаксации показывают, что хлорадамантан, как и адамантан, представляет собой пластичный кристалл (ориентационно неупорядоченная фаза), который находится в ГЦК-пластической фазе между температурой перехода  $T = 244,2$  К и температурой плавления  $T_m = 442,5$  К. При низких температурах и высоких давлениях происходит фазовый переход первого рода, при котором хлорадамантан кристаллизуется в моноклинную (упорядоченную) фазу [2].

Ультразвуковое исследование упругих характеристик при фазовых переходах в адамантане и хлорадамантане было проведено при давлениях 0–1,4 ГПа и температурах 77–293 К. Насколько нам известно, такие исследования не проводились. Существуют только данные об упругих свойствах монокристаллов адамантана при нормальных условиях [3]. Измерение скорости ультразвука и длины образца проводилось на аппарате высокого давления типа «цилиндр-поршень» в диапазоне давлений 0–1,4 ГПа и температур 77–293 К. Образцы (99 %) (Aldrich Chem. Co.) высотой 8–10 мм и диаметром 18 мм помещали в тонкостенную дюралюминиевую капсулу, а затем в ячейку высокого давления. Ультразвуковые измерения проводились на оригинальной установке, собранной на платформе National Instruments PXI. Для генерации и регистрации ультразвуковых волн использовались преобразователи на основе пьезокерамических пластин  $LiNbO_3$  с резонансными частотами 5–10 МГц. Время прохождения ультразвукового сигнала измерялось с точностью  $\sim 1$  нс. Высота образца измерялась с точностью до 1 мкм. Фазовые переходы регистрировались по скачкам на экспериментальных зависимостях времени прохождения ультразвуковой волны и длины образца. Модули сжатия  $B$  и сдвига  $G$  для исследуемых материалов рассчитывались по экспериментальным данным.

Зависимости адиабатического модуля объемной упругости  $B(P)$  и сдвига  $G(P)$  адамантана от давления при изотермическом ( $T = 293$  К) сжатии пластической (ориентационно разупорядоченной) фазы показаны на рисунке 1 в сравнении с аналогичными данными для 1-хлорадамантана. Резкое изменение свойств при сжатии вблизи  $P \approx 0.43$  ГПа для  $C_{10}H_{16}$  и  $P \approx 0.25$  ГПа для  $C_{10}H_{15}Cl$  (рис. 1) соответствует переходу пластической фазы (ориентационно разупорядоченной) в упорядоченную фазу. Замена одного атома водорода на хлор значительно снижает оба модуля упругости, особенно модуль сдвига ( $\approx 30\%$ ). Зависимости объемного модуля упругости  $B$  от давления практически линейны, а его производные от давления для адамантана и хлорадамантана близки друг к другу ( $B' \approx 10-12$ ). Однако скачок на зависимости  $B(P)$

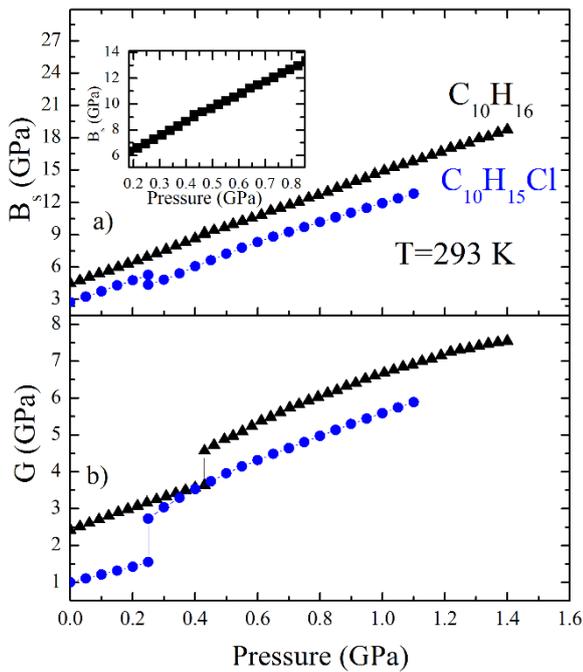


Рисунок 1 – Барические зависимости модуля объемной упругости  $B$  и сдвига  $G$  при комнатной температуре

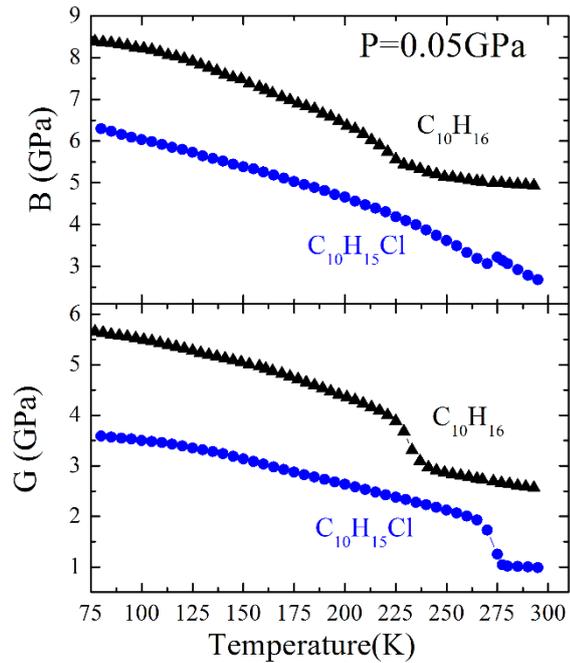


Рисунок 2 – Температурные зависимости упругих модулей при изобарическом отогреве

адамманта от давления практически не наблюдается при переходе от пластической к упорядоченной фазе, в то время как зависимость модуля объемной упругости хлорадамманта от давления имеет скачок почти на 17 %.

Переход порядок – беспорядок исследовался также в режиме естественного отогрева со скоростью около 1 К/мин от  $T = 77$  К до 295 К при давлении  $P = 0,05$  ГПа. На рисунке 2 представлены температурные зависимости модулей упругости  $C_{10}H_{16}$  и  $C_{10}H_{15}Cl$ . Наблюдаемое поведение физических характеристик однозначно указывает на структурный фазовый переход в пластическую фазу. При повышении температуры мы наблюдали значительное уменьшение модулей упругости перед переходом, а затем скачкообразное изменение модулей во время перехода, за исключением модуля  $B$  адамманта. Как и в экспериментах под давлением, температурная зависимость объемного модуля упругости  $B$  не демонстрирует резкого изменения, и переход сопровождается плавным изменением этого модуля.

**Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (Грант РНФ № 19-12-00111).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Beake, E., Tucker, M.G., Dove, M. T., and Phillips A. E. *ChemPhysChem*, 2017, 18, pp. 459–464.
2. Fraczyk, L. A., Huang, Y. *Spectrochimica Acta Part A*, 2001, 57, pp. 1061–1071.
3. Drabble, J. R. and Husain, A.H. M. *J. Phys. C: Solid St. Phys.*, 1980, 13, pp. 1377–1380.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЛИГОМЕРОВ ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Данилов И.В., Громницкая Е.Л., Бражкин В.В.

Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН,

Троицк, Москва, Россия

idaniilov@hppi.troitsk.ru

Молекулярные глассформеры – это многочисленный класс жидкостей, имеющих обширное применение в химической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности, однако характер межчастичного взаимодействия в этих веществах изучен недостаточно. Существенную роль в межмолекулярном взаимодействии молекулярных глассформеров играют водородные связи. В исследованных нами веществах (моно-, ди- и трипропиленгликоле) массы и длины молекул отличаются, однако количество гидроксильных ОН групп остается постоянным и равно двум [1,2]. Мы исследовали упругие свойства олигомеров пропиленгликоля под давлением как в жидком, так и в стеклообразном состоянии, а также при фазовом переходе стекло-жидкость. Исследования проводились на ультразвуковом пьезометре типа цилиндр-поршень до давления 1 ГПа в жидкой фазе и до 1.8 ГПа в стеклообразной фазе, а также при переходе стекло-жидкость при изобарических отогревах в интервале температур от 77 до 295 К. Импульсным методом измерялись продольная и поперечная скорости ультразвука на частотах 10 МГц и 5 МГц, соответственно, при этом проводились прямые измерения объема под давлением. По этим данным рассчитывались модули объемной упругости  $B$  и сдвига  $G$ .

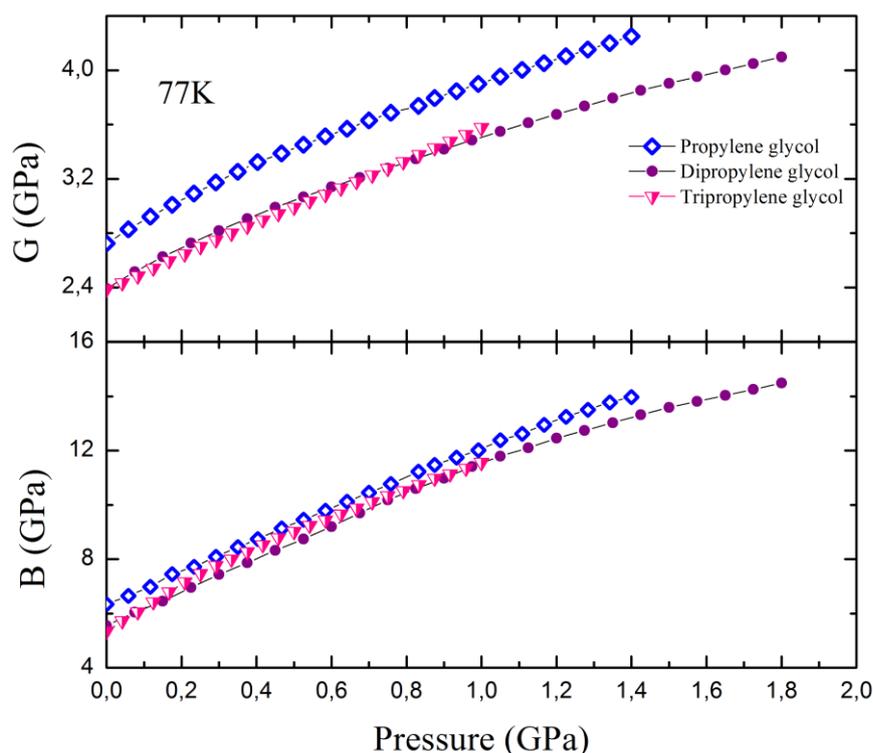


Рисунок 1 – Барические зависимости модуля сдвига и модуля объемной упругости стеклообразных олигомеров пропиленгликоля ( $T=77$  К)

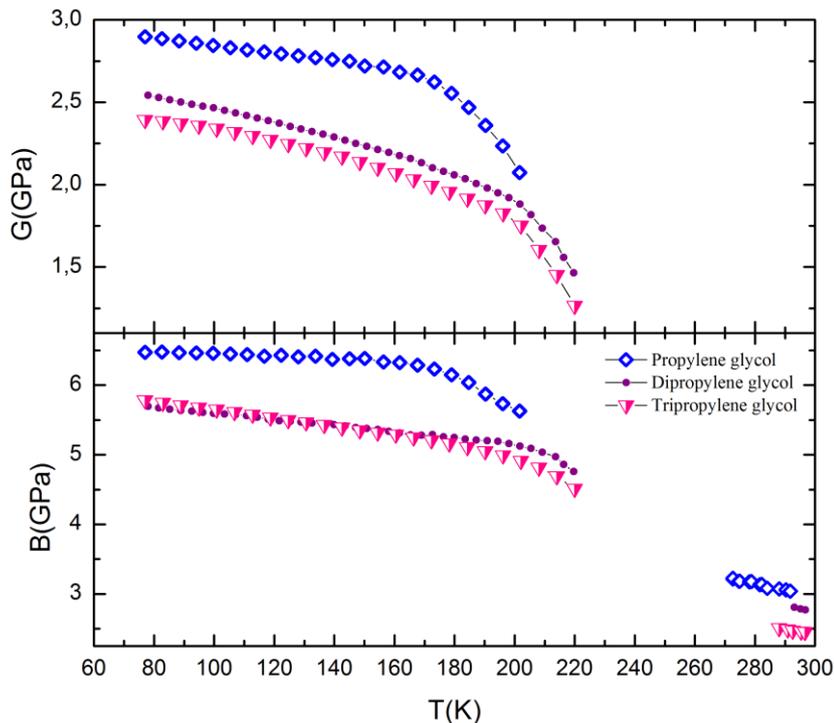


Рисунок 2 – Температурные зависимости упругих модулей олигомеров пропиленгликоля при расстекловании ( $P = \text{const} = 0.05 \text{ GPa}$ )

Сопоставление результатов экспериментов выявило схожий характер поведения сжимаемости олигомеров как в жидкой, так и в стеклообразной фазе. Однако несмотря на то, что модули сдвига и объемной упругости ди- и трипропиленгликоля были существенно ниже, чем у монопропиленгликоля, их барические производные были выше (рис. 1), что выполнялось как в жидком, так и в стеклообразном состоянии. При отогреве от 77 К до комнатной температуры обнаружилась монотонная зависимость упругих модулей и температуры стеклования от массы молекул (рис. 2).

**Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД-6103.2021.1.2).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Leo'n, C., Ngai, K. L., Roland, C. M. Relationship between the primary and secondary dielectric relaxation processes in propylene glycol and its oligomers. – J. Chem. Phys. – 199. – 110 (23), pp. 11585–11591.
2. Casalini, R., Roland, C. M. Excess wing in the dielectric loss spectra of propylene glycol oligomers at elevated pressure. – Phys. Rev. B. – 2004. – 69, pp. 094202–094208.

## УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СУШИЛКИ БАРАБАННОГО ТИПА ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Боченков А.С., Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А.

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,

Бийск, Россия,

e-mail: sergey@bti.secna.ru

Эффективность реализации процесса сушки в значительной степени определяет качество и себестоимость конечного продукта, условия его хранения и транспортировки. Одним из способов сокращения времени и энергозатратности сушки является воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности.

Ультразвуковая (УЗ) сушка используется с 40–50-х годов прошлого столетия [1], применяется сегодня для сушки термолабильных, легкоокисляемых и взрывчатых веществ, однако до сих пор не получила широкого промышленного распространения для сушки продуктов питания [2, 3, 4]. Обусловлено это малой глубиной проникания УЗ колебаний в высушиваемый материал, т.е. малой массой (как правило, не более 1–10 кг) одновременно высушиваемого материала.

В связи с этим актуальными являются исследования по созданию УЗ сушилок, обеспечивающих значительно большие объемы высушиваемого материала.

Для понимания принципиальных возможностей ультразвукового воздействия были проведены исследования по сушке материала, расположенного в слое определенной толщины. Ультразвуковое воздействие при этом осуществлялось как параллельно, так и перпендикулярно поверхности слоя. В качестве тестового материала использовался горох с влажностью 21 %, скорость воздушного потока – 0,5 м/с, температура воздуха 60 °С, частота ультразвуковых колебаний – 22 кГц, уровень звукового давления 165±3 дБ. Сушка заканчивалась при достижении влажности гороха 16 %. Результаты сушки различных по толщине слоев представлены на рисунке 1.

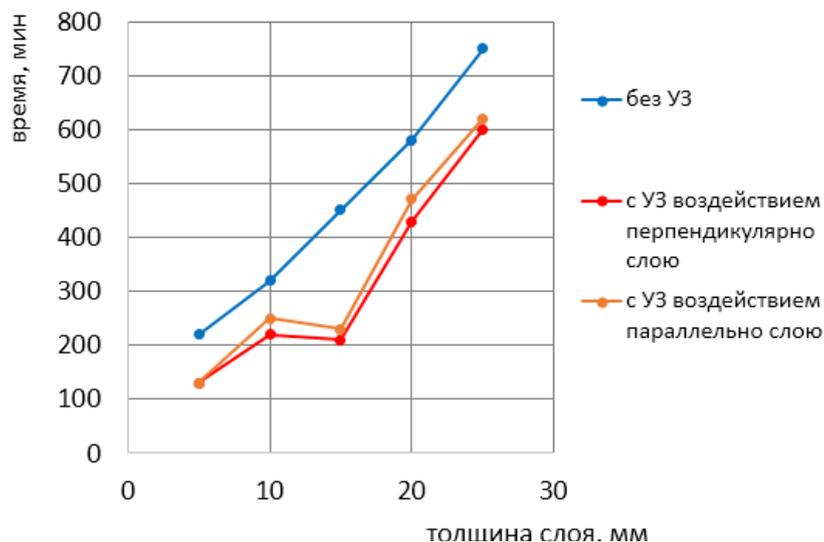


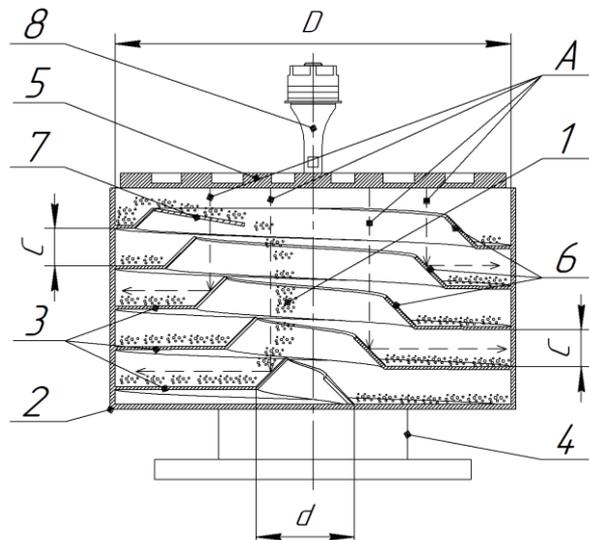
Рисунок 1 – Зависимости времени сушки от толщины слоя гороха

Полученные результаты позволяют установить слой высушиваемого материала, равный 15 мм, при котором эффективность УЗ воздействия относительно конвективной сушки составляет 53 %. Такая толщина слоя соответствует длине волны УЗ колебаний в воздухе на частоте воздействия. Параллельное воздействие УЗ колебаний на высушиваемый материал менее эффективно (на 9%).

Выявление оптимальной толщины слоя позволило предложить конструкции вращающихся сушилок барабанного типа (вертикального и горизонтального),

способных обеспечить существенное повышение производительности сушки за счет размещения большого количества материала для сушки в слоях резонансной толщины и воздействия на них УЗ колебаниями через резонансные воздушные промежутки.

Конструкция ультразвуковой сушилки с вертикальным вращающимся барабаном представлена на рисунке 2.

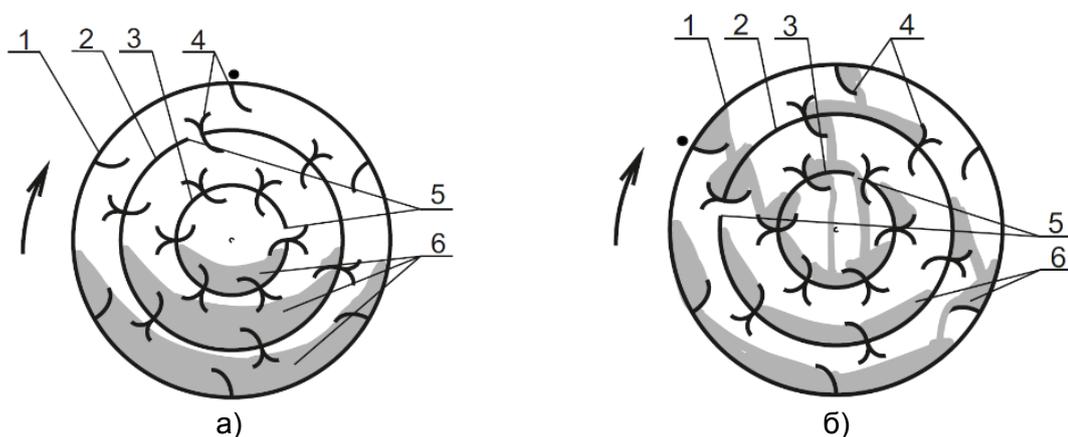


- 1 – высушиваемый материал; 2 – цилиндрический барабан; 3 – спиральный лоток; 4 – вибропривод; 5 – ультразвуковой излучатель; 6 – отражатель ультразвуковых колебаний; 7 – верхний виток спирального лотка; 8 – пьезопреобразователь; А – максимальное и минимальное расстояния от излучателя до двух диаметрально расположенных участков спирального лотка; D – диаметр барабана; d – внутренний диаметр витков спирального лотка; С – расстояние между витками спирального лотка

Рисунок 2 – Конструкция ультразвуковой барабанной сушилки вертикального типа

В такой сушилке сыпучий материал 1 помещается в цилиндрический барабан 2 через технологическое отверстие. Размещение материала осуществляется как на нижней торцевой стенке барабана, так и на витках спирального лотка 3. Спиральный лоток имеет внешний диаметр несколько меньше, чем диаметр барабана D, внутренний диаметр d постепенно увеличивается к верхней части барабана, при этом шаг витков по вертикали C должен быть не менее 30 мм для свободного перемещения сыпучего материала. Движение высушиваемого материала по виткам лотка в верхнюю часть барабана осуществляется путем вибрации и вращения спирального лотка за счет вибропривода 4. УЗ воздействие на материал осуществляет дисковый излучатель 5, соединенный с пьезопреобразователем 8. УЗ колебания достигают отражателя 6, располагающегося под углом 45 градусов к образующим цилиндрической поверхности барабана, и затем, воздействуя на сыпучий продукт, отражаются от стенок барабана обратно к отражателям и диску. УЗ колебания воздействует на высушиваемый продукт на всех витках спирального лотка. При этом продукт, достигая верхнего витка спирального лотка 7, пересыпается на нижнюю торцевую поверхность барабана.

Аналогичным образом повышение производительности сушки может быть обеспечено при использовании барабанной сушилки горизонтального типа, работа которой поясняется рисунком 3. Внутри барабана 1 (корпуса сушилки) соосно с ним располагаются цилиндрические поверхности меньшего диаметра 2 и 3. На каждой цилиндрической поверхности с внешней и внутренней стороны (на корпусе только с внутренней стороны) располагаются лопасти 4, обеспечивающие захват и удержание сыпучего продукта. Вдоль образующей каждой цилиндрической поверхности по всей длине сделаны продольные отверстия 5 для пересыпания сыпучего продукта 6 из одного объема в другой. В одну из торцевых стенок установлен УЗ дисковый излучатель. Для усиления колебаний расстояние от диска до противоположной стенки барабана должно быть кратным половине длины ультразвуковых колебаний.



а) начальное положение, б) поворот барабана на 300 градусов  
Рисунок 3 – Принцип работы УЗ барабанной сушилки горизонтального типа

Через технологическое отверстие в сушилку помещают сыпучий продукт, затем с помощью электродвигателя барабан вращается с частотой 5–10 об/мин. Свойства сыпучего продукта в начале сушки и в процессе сушки будут влиять на скорость вращения барабана. В результате подхватывания материала лопастями и его пересыпания с внешних на внутренние цилиндрические поверхности, а также пересыпание из одного объема в другой через продольные отверстия, происходит распределение материала оптимальными слоями.

В результате работы созданы практические конструкции сушилок с производительностью не менее 20 кг, обеспечивающие сушку тестовых образцов гороха за 200 мин (380 мин без УЗ воздействия).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг, Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука: [в 3 кн.]. – Москва : Наука, 1967–1970.
2. Siucinska, K., Konopacka, D. Application of Ultrasound to Modify and Improve Dried Fruit and Vegetable Tissue: A Review. *Dry Technol.* – 2014, 32, pp. 1360–1368. DOI: 10.1080/07373937.2014.916719.
3. Sabarez, H. T., Gallego-Juarez, J. A., Riera, E. Ultrasonic-Assisted Convective Drying of Apple Slices. *Dry Technol.*, 2012, 30, pp. 989–997. DOI: 10.1080/07373937.2012.677083.
4. Хмелев, В. Н., Шалунов, А. В., Нестеров, В. А., Терентьев, С. А., Тertiшников, П. П. Ультразвуковая сушка капиллярно-пористых материалов // Труды Всероссийской акустической конференции. Материалы III Всероссийской конференции. – 2020. – С. 203–208.

## **УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И ПАЙКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**Вьюгинова А.А.<sup>1</sup>, Новик А.А.<sup>2</sup>, Вьюгинов С.Н.<sup>2</sup>, Лбов А.А.<sup>2</sup>, Новик А.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, РФ, [aavyuginova@etu.ru](mailto:aavyuginova@etu.ru)

<sup>2</sup>ООО «ИНЛАБ-Ультразвук», Санкт-Петербург, РФ, [inlab@utinlab.ru](mailto:inlab@utinlab.ru)

Технологии ультразвуковой сварки и ультразвуковой пайки металлических изделий повсеместно применяются в самых различных областях промышленности. Данные технологии являются совершенно разными с точки зрения физических принципов, реализуются в разных условиях, однако обе технологии эффективно решают задачу соединения металлов, обеспечивая высококачественный контакт и возможность получения результатов, недостижимых без использования энергии ультразвука.

Ультразвуковая сварка металлов реализуется в твердой фазе и протекает без плавления основного металла. Под действием тангенциально направленных ультразвуковых колебаний и нормально направленного давления происходит образование соединения металл-металл – действие постоянных и переменных напряжений ускоряет пластическое деформирование микронеровностей, сближает поверхности, при этом в зоне сварки разрушаются и эвакуируются окисные пленки и загрязнения и образуются зоны физического контакта свариваемых поверхностей; с течением времени площадь зон схватывания увеличивается, и в дальнейшем в процессе сварки образуются и растут на границе общие зерна металла, т.е. происходит процесс рекристаллизации [1,2]. Примеры соединений, полученных с применением технологии ультразвуковой сварки металлов, приведены на рисунке 1. Следует отметить, что с помощью данной технологии возможно получение соединения между металлами и неметаллами, в частности, между металлами и керамикой или стеклом [3]. Одним из относительно новых и развивающихся направлений применения данного способа соединения являются аддитивные технологии [1,4,5].



Рисунок 1 – Ультразвуковая сварка металлов

Ультразвуковая пайка металлов – бесфлюсовая технология, основанная на процессах, протекающих в жидкой фазе, на эффектах, возникающих в расплавленном припое. Введение ультразвуковых колебаний в расплавленный припой создает в нем кавитацию и ряд сопутствующих явлений: звуковое давление, акустические потоки. Схлопывание кавитационных пузырьков создает ударные волны, давление в которых может достигать значительных величин, такие микроудары разрушают оксидные пленки и загрязнения на паяемой поверхности, которая затем хорошо смачивается припоем. Возникающие микро- и макропотоки также способствуют удалению оксидных пленок и ускорению процесса смачивания поверхности металла припоем, кроме того, кавитация в жидкой среде ускоряет химические реакции и играет главную роль в ультразвуковой активации [6,7]. Примеры реализации ультразвуковой пайки и лужения приведены на рисунке 2. Возможно нанесение припоя на металлы и неметаллы, технология может быть в частности применена для создания «умного текстиля» [8].

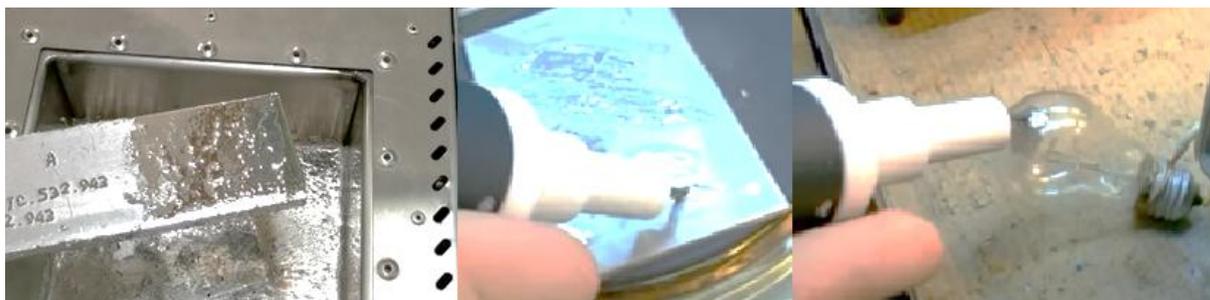


Рисунок 2 – Ультразвуковая пайка и лужение металлов и неметаллов

Для осуществления указанных технологий ООО «ИНЛАБ-Ультразвук» разрабатывает и производит стандартное и специализированное оборудование. Одним из вариантов стандартного оборудования для ультразвуковой сварки металлов является классический пресс для сварки изделий больших сечений с приложением давления и тангенциальных ультразвуковых колебаний (рис. 3). В состав комплекта входят станина, ультразвуковой генератор, акустическая система: магнитострикционный преобразователь и излучающий волновод, контроллер управления технологическим процессом [9].

Одной из особенностей данного оборудования является применение высокоэффективных магнитострикционных преобразователей, которые обеспечивают стабильность работы системы при значительных механических нагрузках. Контроллер позволяет настраивать цикл ультразвуковой сварки для обеспечения повторяемости ее результатов – пример сварочного цикла длительностью 5.1 с. также приведен на рисунке 3.

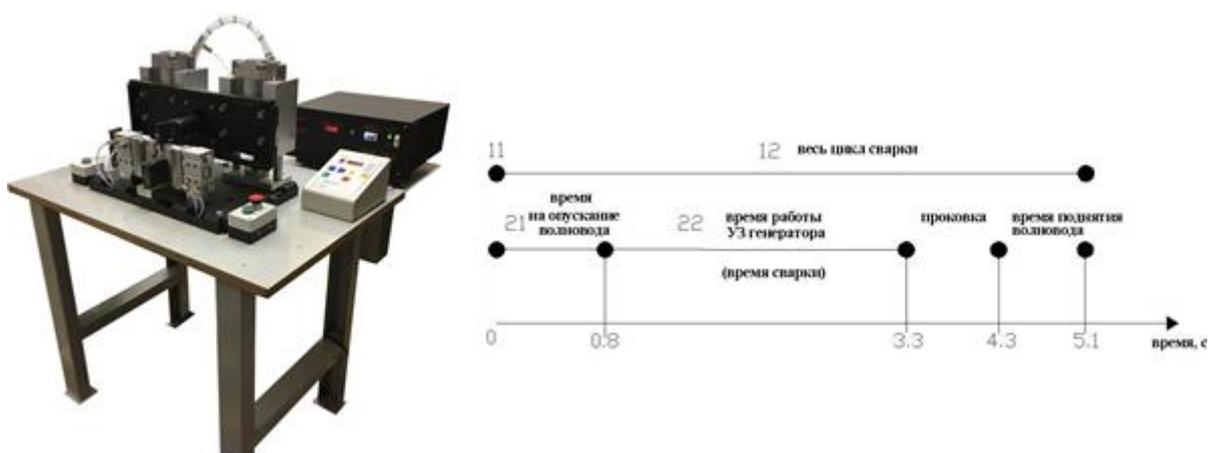


Рисунок 3 – Ультразвуковая сварочная машина для сварки металлов и пример цикла ультразвуковой сварки металлических изделий

Для реализации технологий ультразвуковой пайки, лужения и металлизации ООО «ИНЛАБ- Ультразвук» разрабатывает и производит ультразвуковые паяльники и ванны лужения [9], на рисунке 4 приведен внешний вид ванны лужения (без ультразвукового генератора) и комплектный ультразвуковой паяльник.

Применение в данных устройствах магнитострикционных электроакустических преобразователей выгодно отличает их от аналогов на основе пьезоэлектрических преобразователей, обеспечивая стабильность работы систем и длительный срок эксплуатации, так как магнитострикционные преобразователи малочувствительны к тепловой и механической нагрузке, их свойства не подвержены деградации.

Еще одной отличительной особенностью ультразвукового паяльника от ООО «ИНЛАБ-Ультразвук» является биметаллическая конструкция ультразвукового излучателя – жала паяльника. К излучателю в данном случае предъявляется набор требований как с точки зрения акустики, так и с точки зрения теплопроводности.



Рисунок 4 – Ультразвуковая ванна лужения и ультразвуковой паяльник

Эти требования невозможно удовлетворить, применяя металлы, из которых традиционно изготавливаются ультразвуковые волноводы или жала паяльников, поэтому их свойства объединены в биметаллической конструкции, которая прекрасно себя проявила в выпускаемых устройствах; был разработан способ исследования резонансных свойств таких излучателей для обеспечения максимальной эффективности их работы. Пример биметаллических волноводов-жал приведен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Биметаллические волноводы-жала ультразвукового паяльника

Производимое ультразвуковое оборудование, в том числе для реализации технологий ультразвуковой сварки и пайки металлических изделий, непрерывно совершенствуется, разрабатываются новые решения для аналоговых и цифровых алгоритмов ультразвуковых генераторов и контроллеров, оптимизируются характеристики акустических систем, повышается удобство интерфейса и эргономические свойства модулей для соответствия современным стандартам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько, В. М., Фатюхин, Д. С. Ультразвуковые технологии на современном этапе развития машиностроения // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 8. – С. 37-42. DOI: 10.12737/20815
2. Gallego-Juárez, J. A., Graff, K. F. Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound // Woodhead Publishing. Oxford. – 2015. DOI: 10.1016/C2013-0-16435-5
3. Wagner, G., Balle, F., Eifler, D. Ultrasonic Welding of Hybrid Joints. JOM. – 2012. – Vol. 64, pp. 401–406. DOI: 10.1007/s11837-012-0269-5
4. Конов, С. Г., Котобан, Д. В., Сундуков, С. К., Фатюхин, Д. С. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 28–34.
5. Friel, R. J., Harris, R. A. Ultrasonic Additive Manufacturing – A Hybrid Production Process for Novel Functional Products. Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6, pp. 35–40. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.004.

6. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2 т. Т. 1 / С. П. Кундас, В. Л. Ланин, М. Д. Тявловский; под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 404 с.

7. Ланин, В. Л. Ультразвуковая пайка и лужение в электронике // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 7.

8. Micus, S., Haupt, M., Gresser, G. T. Automatic Joining of Electrical Components to Smart Textiles by Ultrasonic Soldering. Sensors. – 2021. – Vol. 21, p. 545. DOI: 10.3390/s21020545

9. Ультразвуковое технологическое оборудование [Электронный ресурс] // URL: <http://utinlab.ru>. – Дата обращения: 25.03.2021.

## **ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ СРЕДЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НИКЕЛЯ ПРИ МИКРОУДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПУЗЫРЬКОВ КАВИТАЦИИ**

**Короткевич С.В.**

*РУП «Гомельэнерго», Гомель, Беларусь  
korotstv@tut.by*

**Введение.** В проблеме повышения надежности и долговечности машин и механизмов важную роль играет снижение интенсивности процессов разрушения и изнашивания деталей, подверженных воздействию быстротекущих потоков агрессивных сред. В этом случае происходит интенсивное кавитационно-эрозионное изнашивание, обусловленное комплексным влиянием механических микроударных воздействий и химической активности жидкостной среды. Этот вид изнашивания характерен для двигателей внутреннего сгорания, оборудования гидротранспорта, различных насосов и т. д.

**Методика эксперимента.** Исследования свойств поверхностного слоя при такого рода воздействиях имеет определенное значение для изучения объемной и поверхностной прочности и на их основе прогнозирования износостойкости деталей машин. Роль среды при кавитационном и эрозионном изнашивании металлов определяется, в первую очередь, свойствами пластически деформируемых при микроударном воздействии жидкости поверхностных слоев. Образцы из поликристаллического никеля предварительно отжигали в вакууме  $\approx 0,133$  мПа при температуре 800 °С в течение 18 кс. Испытание проводили при ультразвуковой кавитации с частотой 22 кГц и амплитудой колебаний 40 мкм на установке с магнитострикционным вибратором на базе генератора УЗДН-1. Температура рабочих сред термостатировалась при 20 °С.

**Результаты и обсуждение.** Исследование дислокационной структуры поликристаллического никеля проводили при кавитационном изнашивании в дистиллированной воде, кислом растворе с  $\text{pH} = 4,5$  (натрий фосфорнокислый двузамещенный + лимонная кислота), щелочном растворе с  $\text{pH} = 12,5$  (едкий натр + бора) и в дистиллированной воде с добавкой ПАВ (4,1 моль/кг пропилового спирта) методом ферромагнитного резонанса (ФМР) [1]. Изменение прочностных свойств поверхностного слоя при кавитационном нагружении носит циклический характер. В начальный период испытания ширина линии ФМР возрастает, достигая максимального значения, после чего уширение линии ферромагнитного резонанса ( $\Delta H$ ) заметно спадает. Положение и величина максимума  $\Delta H$  зависят от химической и поверхностной активности среды. Более детально зависимость  $\Delta H = f(\tau)$  изучена для случая кавитационного воздействия в дистиллированной воде и в щелочном растворе с  $\text{pH} = 12,5$ . Возрастание  $\Delta H$  в начальный период испытания можно связать с микроупрочнением кристаллической решетки при пластической деформации, обусловленной ударным воздействием среды (рис. 1). Результаты исследований показали (рис. 1), что уширение линии ФМР связано с плотностью дислокаций и изменяется при данном режиме нагружения с периодом  $\approx 7,2 \div 14,4$  кс. Учитывая ранее рассмотренные физические процессы появления циклических зависимостей с точки зрения дислокационных представлений в рамках лепестково-послойного характера разрушения и изнашивания поверхностного слоя, можно отметить, что в данных условиях изнашивание происходит путем периодического накопления дефектов, разрушения и удаления тонких поверхностных слоев металла [2].

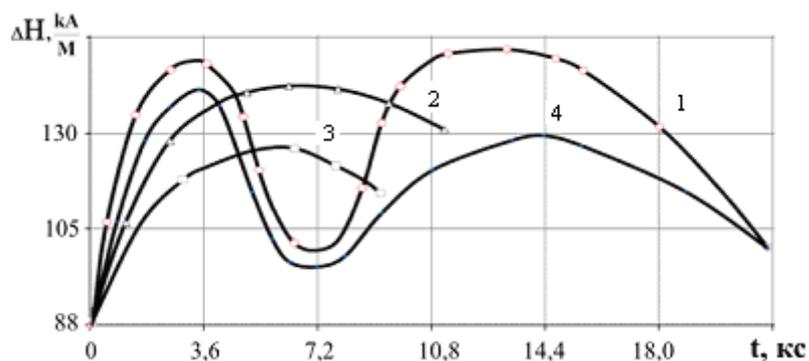


Рисунок 1 – Зависимость ширины линии ( $\Delta H$ ) ФМР от времени кавитационного изнашивания ( $t$ ): 1 – в дистиллированной воде; 2 – в кислом растворе ( $pH = 4,5$ ); 3 – в растворе ПАВ; 4 – в щелочном растворе ( $pH = 12,5$ )

Определение потерь массы (взвешиванием на аналитических весах) при кавитационном изнашивании в дистиллированной воде подтверждает циклический характер износа [1].

Известно, что в кислых средах никель не обладает высокой коррозионной стойкостью. Поэтому меньшие, чем в дистиллированной воде, скорость и степень наклепа при изнашивании в кислом растворе обусловлены облегчением стока дефектов в образующиеся микротрещины при коррозионном растрескивании металла [3].

Малая степень наклепа при испытании в дистиллированной воде с добавкой ПАВ объясняется сложной взаимосвязью следующих основных факторов: образованием на поверхности металла гидрофобного слоя из адсорбированных молекул ПАВ, играющего защитную роль при микроударном воздействии; изменением при добавке ПАВ поверхностного натяжения, плотности, сжимаемости жидкости и уменьшением в связи с этим интенсивности изнашивания; пластифицированием поверхности металла [4].

При испытании в щелочном растворе происходит адсорбция ионов на поверхности металла с последующим образованием малорастворимых гидроксидных пленок. Появлением таких пленок, препятствующих выходу дислокаций, и объясняется большая, чем в кислом растворе и растворе ПАВ, степень наклепа [1].

Данные об уширении рентгеновских линий, полученные при рентгеноструктурном анализе тех же образцов после кавитационного нагружения общей продолжительностью, соответствующей периоду упрочнения, подтверждают результаты ФМР [1].

Влияние среды на прочность может быть объяснено проникновением активного вещества в зону образования зародышевой трещины у скопления дислокаций. Транспорт активного вещества идет не только за счет диффузии, но и вдоль линий дислокаций и особенно вдоль полых дислокационных ядер. При этом происходит резкое уменьшение поверхностного натяжения, что облегчает образование и развитие поверхностных и внутренних микротрещин. Проникновение вещества по трещинам и разрывам интенсифицирует дальнейшее разрушение поверхностного слоя. Эти предпосылки подтверждаются меньшим уровнем критической плотности дислокации, при котором наступают процессы релаксации напряжений, выражающиеся в спаде  $\Delta H$ , а также меньшим периодом осцилляций, характеризующим акт элементарного отслаивания материала [5].

**Заключение.** Продолжительность и интенсивность внешнего воздействия посредством нагрузочно-скоростных факторов и физико-химического действия среды на поверхность металла определяют структуру и величину аккумуляции энергии деформации поверхностным слоем металла при различных внешних воздействиях: прокатке, трибонагружении, ультразвуковых колебаниях, что устанавливает:

– увеличение скорости упрочнения ( $\Delta H/\Delta t$ ) при внешнем воздействии на поверхностный слой металла, определяет снижение временного периода цикла

изменения прочностных свойств, а физико-химическая природа среды и её адсорбционная способность определяют прочностные свойства сформировавшегося граничного смазочного слоя и соответственно величину амплитуды уширения линии ферромагнитного резонанса или критическое значение плотности дислокаций;

– увеличение скорости упрочнения поверхностного слоя металла определяет снижение временного периода цикла изменения прочностных свойств с  $\approx 14,4$  кс для кислого раствора до  $\approx 7,2$  кс для дистиллированной воды и щелочной среды и соответственно увеличение интенсивности изнашивания;

– снижение критического значения плотности дислокаций при котором начинается разупрочнение поверхностного слоя металла с увеличением энергии деформации, аккумулированной в поверхностном слое никеля, что понижает уровень энергии активации релаксации деформации на столько, что он выполняет роль регулятора, как количества и размера дефектов, так и способа их распределения и корпоративного взаимодействия, определяя упрочнение поверхности с формированием нано и субмикроструктурных структур либо формирование пористости и её разрушение;

– структурно-масштабные уровни деформации, вид и интенсивность разрушения, размер частиц изнашивания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пинчук, В. Г. Микроструктура и разрушение металлов при трении / В. Г. Пинчук, С. В. Короткевич, В. В. Свиридова. – Гомель: Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2009. – 150 с.

2. Пинчук, В. Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В. Г. Пинчук, С. В. Короткевич. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 180 с.

3. Пинчук, В. Г. Взаимосвязь микроструктурных критериев разрушения поверхности металлов и физико-химических свойств среды при трении / В. Г. Пинчук, С. В. Короткевич, Е. А. Ковалёв // Материаловедение. – 2016. – № 12. – С. 11–18.

4. Щукин, Е. Д. Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твёрдого тела / Е. Д. Щукин // Вестник Московского университета. – Серия 2. Химия. – 2012. – Т. 53, № 1. – С. 50–72.

5. Мультискейлинг локальной кривизны кристаллической решетки на поверхностях трения металлических материалов как основа механизма их изнашивания / В. Е. Панин, В. Г. Пинчук, С. В. Короткевич, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 72–81.

## ДВИЖЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВ В ПРОТОЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Викулова Т.С.<sup>1,2</sup>, Диденкулов И.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИПФ РАН, <sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского

В проточных акустических системах – резонаторах и волноводах – действие радиационной силы на пузырьки приводит к перераспределению их концентрации в соответствии со структурой акустического поля [1]. Ранее рассматривалось движение пузырьков в относительно слабых акустических полях. В настоящей работе рассматривается движение пузырьков в сильных акустических полях, при которых колебания пузырьков становятся нелинейными. Численно решалось уравнение Рэлея-Плессета для радиуса пузырька:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho}(-P_g + P_0 + P(t) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta\dot{R}}{R}) = 0, \quad (1)$$

где  $R(t)$  – радиус пузырька,  $\rho$  – плотность жидкости (воды),  $P_g$  – давление газа в пузырьке,  $P_0$  – статическое давление,  $P(t)=P_a \cdot \cos(\omega t)$  – акустическое давление,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\eta$  – кинематическая вязкость жидкости. Расчеты выполнялись для следующих параметров ( $T=20$  °C):  $P_0=10^5$  Па,  $\sigma=72.86 \cdot 10^{-3}$  Н/м,  $\gamma=1.4$ ,  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta=8.6 \cdot 10^{-4}$  Па·с, для пузырьков с размерами  $R_0=1-20$  мкм, для частот  $\omega/2\pi=4-70$  кГц и при амплитудах поля  $P_a/P_0=0.1-20$ .

На рисунке 1 приведен пример колебаний радиуса пузырька ( $R_0=1$  мкм,  $P_a/P_0=1.3$ ).

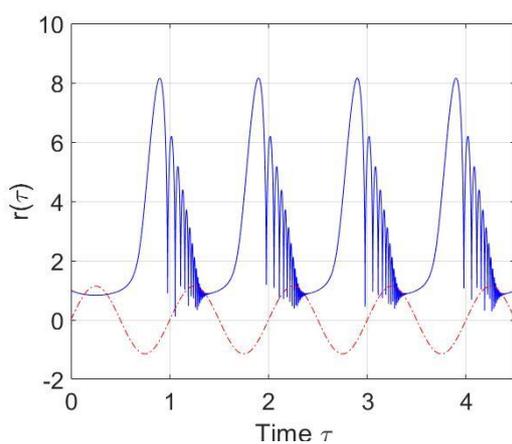


Рисунок 1

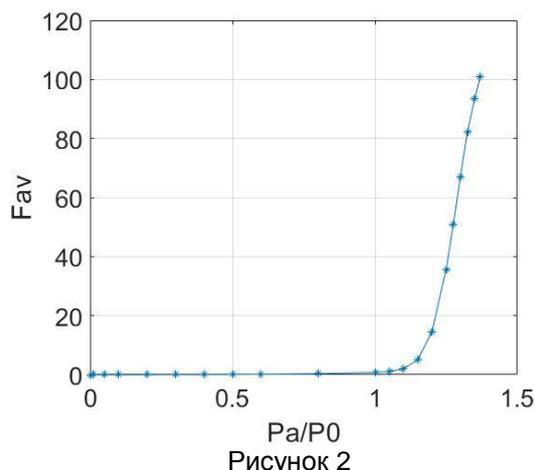


Рисунок 2

Далее вычислялось значение усредненной по периоду поля радиационной силы:

$$F_{av} = -\langle V \cdot \nabla P \rangle, \quad (2)$$

где  $V=4/3\pi R^3$  – объем пузырька,  $\nabla P$  – градиент поля. Ее график приведен на рисунке 2.

Расчеты показали, что при малых амплитудах акустического поля ( $P_a/P_0 \leq 1$ ) радиационная сила пропорциональна квадрату амплитуды поля, а при больших значениях меняется существенно быстрее (показатель степени  $\approx 20$ ). Таким образом, в сильных полях радиационная сила вызывает сильно неоднородное распределение пузырьков. Изменяя амплитуду поля, можно управлять потоками пузырьков и малых частиц.

**Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 2019-02-00317) и в рамках госзадания 0030-2021-0009 ИПФ РАН.**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденкулов, И. Н., Корчагина Т. С., Прончатов-Рубцов, Н. В., Сагачева А. А. // Изв. РАН. Серия физическая. – 2020. – Т.84. – № 6. – С. 772–776.

## ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ТЯЖЕЛОЙ И ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

<sup>1</sup>Муллагаев М. С., <sup>2</sup>Сарваров Д.Г., <sup>3</sup>Рухман А.А., <sup>4</sup>Муллагаев Р.М.

<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии РАН, г. Москва, Россия, [mullakaev@mail.ru](mailto:mullakaev@mail.ru)

<sup>2</sup>ООО «Энегро», г. Екатеринбург, Россия, [sarvarov@enegro.net](mailto:sarvarov@enegro.net)

<sup>3</sup>ООО «Ультразвуковые генераторы», г. Москва, Россия, [aruhman@yandex.ru](mailto:aruhman@yandex.ru)

<sup>4</sup>РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия, [r.m.mullakaev@mail.ru](mailto:r.m.mullakaev@mail.ru)

Оценивая перспективы добычи нефти в мире, можно констатировать – эпоха дешёвой и легко добываемой нефти закончилась. Ресурсы тяжёлых и вязких нефтей в мире оцениваются в 700 млрд тонн, что сопоставимо с мировыми запасами обычной нефти. В РФ запасы тяжёлых и вязких нефтей составляют 7,2 млрд тонн или 28,6 % от балансовых запасов, которые сосредоточены на 267 месторождениях. Поскольку тяжёлые и вязкие нефти будут основным сырьём на ближайшие 50–70 лет, в настоящее время уделяется большое внимание освоению и вводу в промышленную разработку месторождений высоковязких нефтей [1, 2].

Термоакустический скважинный комплекс (КСТА) предназначен для комбинированной обработки призабойной зоны скважины (ПЗС) с тяжелой нефтью различными методами воздействия: ультразвукового (УЗ), индукционного нагрева, химического и их комбинаций [3–5]. Технические характеристики комплекса приведены в таблице 1.

*Состав комплекса КСТА.* Станция управления, прибор скважинный термоакустический (ПСТА), кабель питания на барабане, измерительный кабель, а также монтажный комплект.

Таблица 1 – Технические характеристики комплекса КСТА

Максимальная глубина обработки скважины, м	3500
Мощность прибора при акустическом воздействии, кВт	2
Рабочая частота прибора, кГц	19,0 ± 0,5
Максимальная мощность прибора при нагреве, кВт	5
Рабочая температура прибора, °С, не более	120
Диапазон измеряемой температуры в скважине, °С	от - 40 до +120
Электропитание от 3-фазной сети переменного тока	220/380 В, 50/60 Гц
Потребляемая от сети мощность, кВт	не более 10
Габаритные размеры, мм, не более	
– станция управления	880 x490 x1060
– прибор ПСТА	Ø 102 x 3480

Станция управления предназначена:

- для питания прибора в автоматическом режиме;
- для установки и индикации параметров рабочего режима;
- для записи индицируемых параметров с возможностью их последующего считывания на внешний носитель.

Термоакустический скважинный прибор ПСТА предназначен для возбуждения акустических колебаний и индукционного нагрева в забое нефтяной скважины. Прибор ПСТА состоит из двух секций – секции индукционного нагрева и секции термоакустического воздействия. Для комбинированной обработки ПЗС с использованием химических реагентов предусмотрена подача химических реагентов.

*Конструкция секции индукционного нагрева* (рис. 1). Корпус секции (2) рассчитан на внешнее давление до 15 МПа, в котором размещены функциональные узлы – блок термометрии (6) и четыре одинаковых индуктора (7) мощностью 1,25 кВт каждый. Для фиксации функциональных узлов в корпусе и компенсации теплового расширения индукторов предусмотрены уплотнительные кольца (5). В хвостовой части

секции имеется переходник (1) для монтажа на колонну НКТ. В переходнике предусмотрены пазы для ввода кабеля питания и измерительного кабеля, подключаемых, соответственно, к соединителям (3) и (4). В головной части секции размещен соединитель (8), через который осуществляется питание секции термоакустического воздействия.



*Конструкция секции термоакустического воздействия* (рис. 2). Основой секции и термоакустического воздействия является магнитострикционный преобразователь (1), который состоит из возбуждающей обмотки, выполненной на сердечнике из магнитострикционных пластин, и размещенный в корпусе (2) из нержавеющей стали. Корпус прибора заполнен трансформаторным маслом и служит резонатором. В хвостовой части корпус (2) закреплен соединитель (3), обеспечивающий электрическое соединение с секцией индукционного нагрева. Головная часть секции закрыта наконечником (4).

*Сущность комбинированной технологии обработки ПЗС.* Технология реализуется на скважинах, осуществляющих добычу тяжелой нефти. Их применение происходит во время эксплуатации насосного оборудования, в частности плунжерных насосов. С помощью акустического воздействия осуществляется очистка ПЗС и предварительный разогрев флюида. С целью в зоне продуктивного пласта на НКТ на постоянной основе размещается прибор ПСТА, который соединен с наземным УЗ генератором. Дальнейший нагрев осуществляется с помощью индукционных нагревателей. Созданная технология и комплекс КСТА для добычи тяжелой нефти позволяют за счет синергетических эффектов совместного применения ультразвукового и химического воздействия, а также индукционного нагрева очистить ПЗС, снизить вязкость флюида и повысить коэффициент продуктивности скважины.

*Режимы работы комплекса КСТА:* ультразвуковая, индукционный нагрев, химическая, термоакустическая, сонохимическая и термосонохимическая

*Опытно-промысловые испытания.* Нефтесервисной фирмой ООО «ЦУТ-Сервис» проведены 14 скважино-операций на Самотлорском месторождении (Западная Сибирь) с применением комбинированной технологии обработки ПЗС. Анализ результатов испытаний показывает, что среднесуточный дебит нефтяных скважин увеличился в 1,8 раза, а средний коэффициент продуктивности – в 2,3 раза. Абсолютный прирост среднего суточного дебита скважин составил 4,0 тонны. Продолжительность действия эффекта от УЗО по обработанным скважинам длится от 6 до 10 месяцев [3–5].

ОПИ комбинированной технологии и комплекса КСТА проведены на скважинах Самарской области (ОАО «Самаранефтегаз») [3–5]. Анализ результатов ОПИ показывает, что среднесуточный дебит флюида увеличился в 1,5 раза, среднесуточный дебит скважин увеличился в 2,1 раза, среднее снижение обводненности составило 8,6 %.

Компания ОАО Концерн «Океан прибор» провела испытания на 19 объектах по акустическому воздействию на ПЗС и получила абсолютный прирост дебита по нефти в среднем 5,2 тонны в сутки, с продолжительностью эффекта от 6 до 12 месяцев [6].

В компании ООО «Энегро» проведены лабораторные испытания по акустическому воздействию на вязкую нефть Северо-Комсомольского месторождения, которые показали снижение вязкости на 30 % и снижение нагрузки на перекачивающем насосе на 38 %.

Конструкторами нефтесервисной компании ООО «Энегро» [7] разработано оборудование и технология термоакустического воздействия. Комплекс состоит из станции управления (рис. 3, табл. 2) и термоакустического скважинного излучателя (рис. 4, табл. 3).

Технико-экономическое обоснование внедрения технологии с использованием термоакустического прибора ТАВ, проведенное специалистами фирмы ООО «Энегро», показало:

Таблица 2 – Технические характеристики станции управления

	Наименование параметра	Величина
	Питающее напряжение, В	3x380
	Номинальная мощность, кВт	10
	Выходное напряжение, В	250...660
	Ток подмагничивания, А	0...30
	Выходная частота, кГц	10...60
	Габарит	600*600*250
	Масса	32

Таблица 3 – Технические характеристики термоакустического скважинного излучателя

 <p>Рисунок 4 - Скважинный акустический излучатель</p>	Наименование параметра	Величина
	Мощность потребляемая, кВт	5-10
	Мощность акустическая, кВт	2-5
	Ток подмагничивания, А	10
	Ток возбуждения, А	7
	Рабочая частота, кГц	9-12
	Напряжение питания, В	680
	Коэффициент полезного действия, %	40-50
	Максимальное рабочее давление, МПа	40
	Максимальная рабочая температура, °С	до 260
Габаритные размеры, мм	от 102	
Масса, кг	30	

**а) прибыль по энергозатратам:**

- энергозатраты с УЭЦН 74 кВт\*час по 3,7 руб. за кВт составят 2,3 млн руб. в год;
- при использовании ТАВ затраты с УЭЦН 45 кВт\*час составят 1,4 млн руб. в год. Экономия по работе УЭЦН составит – 0,9 млн руб в год.

**б) затраты на установку ТАВ:**

- капитальные затраты на приобретение и внедрение установки (1 шт.) – 2,5 млн руб.;
- расход электроэнергии (10 кВт\*час по 3,7 руб./кВт) в год 87600 кВт – 0,324 млн руб.;
- оперативный мониторинг в год – 1,825 млн руб. Итого затраты в год – 4,65 млн руб.;

**в) прибыль по дополнительно добытой нефти:**

- по результатам УЗО скважин средний прирост нефти – 4 т/сут;
- при поддержании этого параметра, недропользователь получит – 1460 т/год;

– при стоимости нефти 6000 руб./т – 8,8 млн руб за год.  
Итого с внедрением 1 установки ТАВ в год прибыль составит 5,05 млн руб.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство энергетики Российской Федерации Проект энергетической стратегии России на период до 2035 года. – Москва, 2014. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
2. Муллакаев, М. С. Современное состояние проблемы извлечения нефти // Современная научная мысль. – 2013. – № 4. – С. 185–191.
3. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., Prachkin, V. G. Development of combined technology and the complex for intensification of oil production by means of ultrasound treatment. Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – Vol. 51. – P. 237–242.
4. Mullakaev, M. S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. – М.: HELRI, 2018. – 376 p.
5. Муллакаев, М. С. Ультразвуковая интенсификация процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и переработки нефтешламов. – М.: НИИ ИЭП, 2019. – 412 с.
6. Режим доступа: <http://www.oceanpribor.ru/text/27.htm>.
7. Сарваров, Д. Г. Технология термоакустического воздействия на тяжелую и высоковязкую нефть. – Режим доступа: <https://enegro.net/category/glav/news/>.

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ**

**Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р.**

*Бийский технологический институт, г. Бийск, Россия, roman@bti.secna.ru*

Стойкость материалов и их покрытий при воздействии на них концентрированных потоков вещества и энергии является залогом долгой и надежной работы деталей механизмов и машин, используемых в самых различных областях деятельности человека. Особенно это актуально, когда речь идет об потенциально опасных производствах. Одним из возможных механизмов разрушения материалов и их покрытий является кавитация, которая представляет собой процесс образования и последующего схлопывания парогазовых пузырьков (полостей) в жидкости, сопровождающегося разрушающими материалы кумулятивными струями и ударными волнами.

В настоящее время для определения степени кавитационной эрозии материалов и их покрытий применяется стандарт ASTM G32-10 «Стандартный метод испытаний кавитационной эрозии» [1], где описана методика проведения исследований и рекомендовано применяемое оборудование.

Однако по стандартизированной методологии и на рекомендованном оборудовании контроль реализуется сегодня только при воздействии кавитации в воде при нормальных условиях (температура и давление). Отсутствие возможности реализации такого контроля при высоких температурах (до 1000 градусов по Цельсию) и давлениях при воздействии различными жидкими средами (вода при высокой температуре и давление, масла, расплавы металлов) невозможно по следующим причинам:

- отсутствие теоретических и экспериментальных данных о процессах формирования кавитационного процесса (одиночной кавитационной полости) в различных жидких средах (в основном – неньютоновских и делатантных) при высоких температурах и повышенных давлениях;

- отсутствие данных о процессах формирования кавитационной области (ансамбля полостей), ее воздействии на поверхности материалов и покрытий в различных условиях (по температуре, давлению, вязкости, кавитационной прочности, в изменяющемся до резонансных размеров зазоре, при взаимодействии пузырьков между собой) для установления зависимостей, позволяющих создать метод контроля кавитационной эрозии в аномальных условиях;

- отсутствие исследований и разработок по созданию специализированного ультразвукового оборудования, способного обеспечивать оптимальные воздействия в аномальных условиях.

Таким образом, актуальной является задача создания нового метода и средств контроля стойкости материалов и их покрытий в аномальных условиях [2].

На рисунке 1 представлена схема установки для изучения влияния кавитационных явлений, возникающих в жидких средах в присутствии УЗ полей различной интенсивности при аномальных условиях (высокое давление и температура) на параметры и характеристики УЗ излучателей с целью создания оборудования для исследования кавитационной прочности материалов и их покрытий в таких условиях.

Установка состоит из прочного герметичного корпуса 1, внутри которого размещаются образец 2 с исследуемым покрытием 3, УЗ излучатель 4, нагреватель 5. Патрубок 6 используется для создания в объеме избыточного давления, температурный датчик 7 используется для контроля температуры в жидкой среде 8. Электронный генератор 9 предназначен для питания УЗ излучателя 4, блок контроля 10 предназначен для получения параметров и характеристик УЗ излучателя в ходе УЗ воздействия на исследуемое покрытие.

Кроме того, установка имеет возможность (на рисунке не показано) изменять зазор между плоскостью излучающей поверхности излучателя 4 и плоскостью

исследуемого образца с покрытием или без такового. Регулировка зазора возможна в пределах от нуля до длины УЗ волны в жидкой среде.

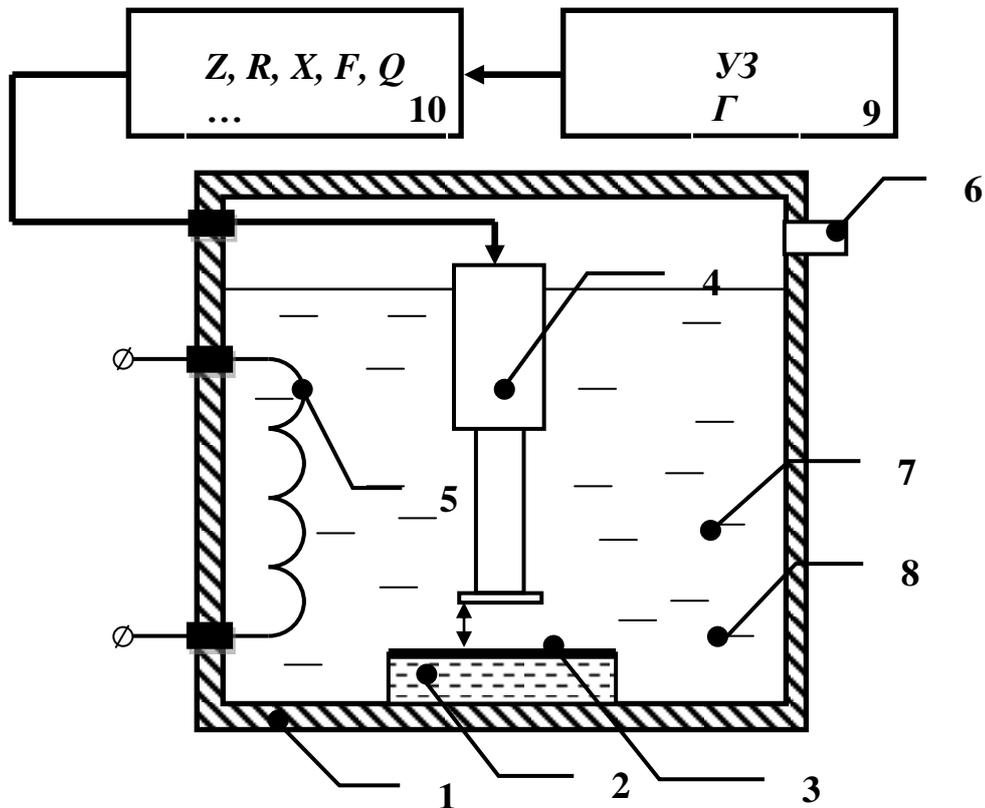


Рисунок 1 – Схема установки для исследования кавитационной прочности покрытий

Блок контроля 10 позволяет фиксировать параметры УЗ излучателя, такие как резонансная частота, добротность, импеданс (модуль и его действительную и мнимую составляющие) на резонансной частоте, частотные и фазочастотные характеристики, полученные при различных условиях (температура, давление, интенсивность УЗ воздействия) и для различных по свойствам жидких сред. Кроме того, блок контроля позволяет определять численные значения эквивалентных электрических RLC параметров УЗ излучателя [3].

Изучение влияния кавитационных явлений на параметры и характеристики УЗ излучателей при аномальных условиях (высокие температуры, давления) позволяет косвенно контролировать кавитационные явления в жидких средах, и, следовательно, обеспечить «нормированную» кавитационную эрозию в процессе исследования стойкости материалов и их покрытий. Возможность косвенного контроля кавитационных явлений является самым главным преимуществом предлагаемого метода, поскольку возможности непосредственного контроля кавитационных процессов и явлений в жидких средах при аномальных условиях просто не существует.

На рисунке 2, в качестве примера, показаны зависимости активного эквивалентного сопротивления механической ветви УЗ излучателя от амплитуды УЗ воздействия. Характерные изменения обусловлены развитием в среде кавитационных явлений (от момента зарождения до развитой кавитации).

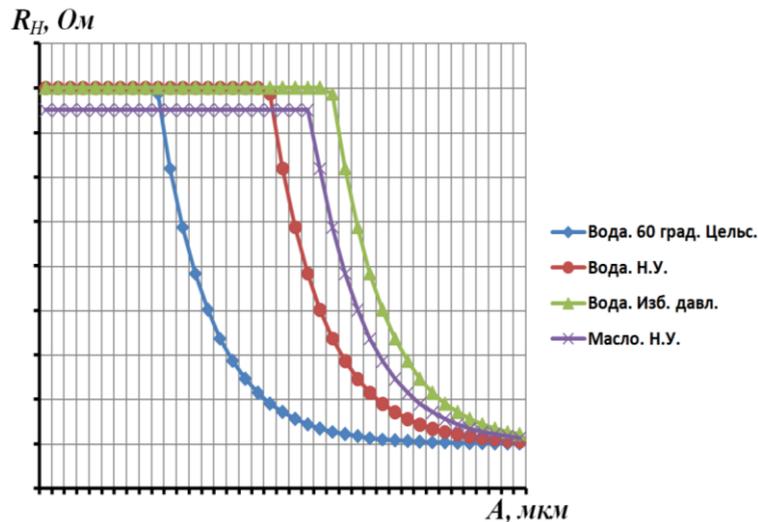


Рисунок 2 – Зависимость изменения активного эквивалентного сопротивления от амплитуды УЗ воздействия для различных условий

Дальнейшее развитие и применение предлагаемого метода, помимо контроля кавитационных явлений, требует непрерывного контроля параметров УЗ излучателей, на которые влияют исходные физические свойства озвучиваемой среды, уровень УЗ воздействия, температура как среды, так и самого УЗ излучателя, давление в среде, геометрия озвучиваемого объема и величина зазора между излучателем и разрушаемой поверхностью. Это может быть обеспечено введением в оборудование систем соответствующего контроля.

Практическая реализация предлагаемого метода и оборудования для определения кавитационной прочности покрытий в аномальных условиях обеспечит создание и применение новых материалов для использования в различных отраслях промышленности.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-011-70001 «Исследование формирования и развития кавитационных процессов при аномально высоких температурах в жидких средах, контактирующих с различными материалами и покрытиями для создания метода и средств контроля их эрозионной прочности».**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM G32-10, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.astm.org](http://www.astm.org).
2. Способ испытаний кавитационной эрозии: пат. Рос. Федерация № 2739145, заявл: 07.09.2020, опубл. 21.12.2020, Бюл. № 36.
3. Хмелев, В. Н., Барсуков, Р. В., Ильченко, Е. В., Попова, Н. С., Генне, Д. В. Контроль параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для исследования кавитационной активности в жидких средах // Датчики и системы. – 2015. – № 7 (194). – С. 25–30.

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРА

Неверов А.Н.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, neverov\_an@mail.ru

Как правило, при расчете ультразвуковых колебательных систем (УКС) мы считаем постоянной амплитуду колебательного смещения (колебательной скорости) либо возбуждающей силы. Это допустимо, однако, только тогда, когда источник внешнего воздействия обладает бесконечно большой мощностью и обратным воздействием УКС на генератор можно пренебречь. В настоящей работе мы учтем, что мощность генератора конечна и УКС оказывает на него обратное влияние.

Рассмотрим колебания механической системы, эквивалентная схема которой представлена на рисунке 1. Возбуждаемый однородный стержень длины  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  характеризуется модулем Юнга  $E$ , плотностью  $\rho$ , добротностью  $Q$ . В сечении  $x=0$  стержень нагружен на некоторое сопротивление, тыльный конец при  $x=l$  свободен. В сечении  $x=x_0$  через пружину связи с коэффициентом упругости  $C_{CB}$  к стержню подключен генератор механических колебаний. Этот генератор представим в виде колебательной системы с сосредоточенными постоянными: массой  $M$ , пружиной с коэффициентом упругости  $C$  и элементом трения, характеризуемым коэффициентом  $h$ . Будем считать, что все эти параметры постоянны, стержень совершает чисто продольные колебания. На вход генератора воздействует гармоническая сила с амплитудой  $F_m$  и частотой  $\omega$  (генератор с независимым возбуждением).

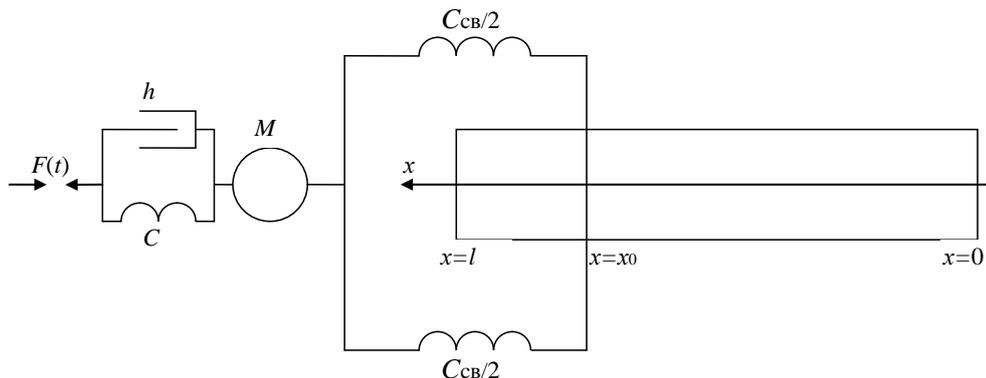


Рисунок 1 – Расчетная схема связанной колебательной системы

Уравнения колебаний стержня и генератора можно записать в виде [1-3]:

$$E \frac{\partial^2 u_j}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = 0, \quad j = 1, 2 \quad (1)$$

$$M \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + h \frac{\partial v}{\partial t} + Cv + C_{CB}(v - u_0) = F(t) = F_m \exp(-i\omega t), \quad (2)$$

где  $u_j$  при  $j=1, 2$  – смещение участков стержня справа и слева от сечения  $x=x_0$ ,  $v$  – смещение массы  $M$  от положения равновесия,  $u_0$  – смещение стержня при  $x=x_0$ ,  $t$  – время.

Из условия сшивания решений (1) и (2) в сечении  $x = x_0$  получаем:

$$ES \left( \frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_0} = C_{CB}(v - u_0); \quad (3)$$

$$u_1(x_0, t) = u_2(x_0, t) = v(t).$$

Смещения сосредоточенной массы и частей стержня справа и слева от сечения  $x = x_0$  с учетом условий нагружения запишем в виде [1]:

$$v = v_m e^{-i\omega t}; \quad u_1 = A \cos(\tilde{k}x + \varphi) e^{-i\omega t}; \quad u_2 = u_1 \cos \tilde{k}(l - x) e^{-i\omega t}, \quad (4)$$

где  $\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \left( 1 + \frac{i}{2Q} \right)$  – комплексное волновое число;  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – скорость звука в стержне;  $Q$  – добротность,  $A$  и  $u_l$  – постоянные, имеющие смысл амплитуд колебательных смещений частей стержня;  $\varphi$  – постоянная, определяемая нагружением стержня при  $x = 0$ , в общем случае комплексная.

Подставляя (4) в (3) и выполнив простые преобразования, получаем систему уравнений относительно  $u_0$  и  $v_m$ , которую запишем в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \omega_r^2 - \omega^2 - 2i\delta\omega & \omega_c^2 \\ \frac{C_{CB}}{\omega w} & \operatorname{tg}(\tilde{k}x_0 + \varphi) + \operatorname{tg}\tilde{k}(l - x_0) - \frac{C_{CB}}{\omega w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_m \\ u_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_m \\ M \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $w = \rho c S$  – характеристическое сопротивление стержня,  $2\delta = \frac{h}{M}$ ,  $\omega_r^2 = \frac{C + C_{CB}}{M}$ ;

$\omega_c^2 = \frac{C_{CB}}{M}$ . Условие собственных частот системы в пренебрежении потерями:

$$\Delta = \left[ \operatorname{tg}(kx_0 + \varphi) + \operatorname{tg}k(l - x_0) - K_{CB}^2 \right] (\omega_r^2 - \omega^2) - K_{CB}^2 \omega_c^2 = 0, \quad (6)$$

где  $k = \tilde{k}$  при  $Q \rightarrow \infty$ ,  $K_{CB} = \sqrt{\frac{C_{CB}}{\omega w}}$  – коэффициент связи.

Уравнение (6) представляет собой условие резонансных частот связанных колебательных систем, одна из которых – стержень – характеризуется распределенными параметрами, а другая – генератор – сосредоточенными. Это условие аналогично условию собственных частот системы, состоящей из двух связанных колебательных контуров с сосредоточенными постоянными.

Решая систему уравнений (5), получаем при резонансе:

$$v_m = \frac{F_m C_{CB} \omega_c^2}{M w \omega (\omega_r^2 - \omega^2) \operatorname{Im} \Delta}; \quad u_0 = -\frac{F_m C_{CB}}{\omega M w \operatorname{Im} \Delta}, \quad (7)$$

где мнимая часть определителя

$$\operatorname{Im} \Delta = \frac{\omega^2 - \omega_r^2}{2Q} \left[ \frac{kx_0 + 2Q\varphi''}{\cos^2(kx_0 + \varphi')} + \frac{k(l - x_0)}{\cos^2 k(l - x_0)} - K_{CB}^2 \right] - K_{CB}^2 \omega_c^2 \left( \frac{2\delta\omega}{\omega_r^2 - \omega^2} - \frac{1}{2Q} \right), \quad (7a)$$

$\varphi'$  и  $\varphi''$  – действительная и мнимая части фазы колебаний, определяемые условиями нагружения стержня при  $x = 0$ . В (7) подставляется частота, найденная из (6).

При нагрузках, много меньших характеристического сопротивления стержня

$$\frac{X_H}{w} = -\frac{\operatorname{tg}\varphi'}{\operatorname{ch}^2\varphi''}; \quad \frac{R_H}{w} = -\frac{\operatorname{th}\varphi'}{\cos^2\varphi''}. \quad (8)$$

Рассмотрим частный случай. Пусть ненагруженный стержень возбуждается гармонической силой с тыльного торца, т.е.  $x_0 = l$ ,  $\varphi = 0$ . Тогда условие (6) принимает вид:

$$\left( \operatorname{tg}kl - K_{CB}^2 \right) (\omega_r^2 - \omega^2) - K_{CB}^2 \omega_c^2 = 0. \quad (9)$$

Будем считать, кроме того, что собственная частота генератора  $\omega_r$  совпадает с первой собственной частотой стержня  $\omega_1$ , а также, что  $K_{CB} \ll 1$ . Тогда естественно предположить, что собственные частоты связанной системы будут мало отличаться от соответствующих собственных частот стержня. В этом случае при  $\omega = \omega_1 + \Delta\omega$ ,

$\Delta\omega \ll \omega_1$ ,  $\operatorname{tg}kl \approx \pi \frac{\Delta\omega}{\omega_1}$ . Тогда условие (9) примет вид:

$$\left( \frac{\Delta\omega}{\omega_1} \right)^2 - \frac{K_{CB}^2}{\pi} \frac{\Delta\omega}{\omega_1} - \frac{K_{CB}^2}{2\pi} \left( \frac{\omega_c}{\omega_1} \right)^2 = 0. \quad (10)$$

Решая уравнение (10), получаем, учитывая слабость связи

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_1}\right)_1 = \frac{K_{CB}^2}{\pi}, \quad \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_1}\right)_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_c}{\omega_1}\right)^2 = -\frac{1}{2}\frac{K_{CB}^2 W}{\omega_1 M}. \quad (11)$$

Таким образом, резонансные частоты связанной системы «расщепляются» аналогично расщеплению собственных частот связанных колебательных систем с сосредоточенными постоянными. Из (11) также ясно, что расщепление повышается при увеличении жесткости связывающей пружины.

Посмотрим теперь, как влияет изменение нагрузки на силу, действующую на сосредоточенную массу  $M$ .

$$F_M = \frac{F_m}{1 - \frac{\omega_r^2}{\omega^2} + K_{CB}^2 \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \frac{C_{CB}}{\omega W} \left[ \text{tg}(\tilde{k}x_0 + \varphi) + \text{tg}\tilde{k}(l - x_0) - \frac{C_{CB}}{\omega W} \right]^{-1}}. \quad (12)$$

Считая, что  $x_0 = l$ , продифференцируем (20) по  $\varphi$ :

$$\frac{\partial F_M}{\partial \varphi} = \frac{F_m K_{CB}^2 \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \frac{C_{CB}}{\omega W}}{\left\{ \frac{\omega_r^2}{\omega^2} - 1 + K_{CB}^2 \frac{\omega_r^2}{\omega^2} \frac{C_{CB}}{\omega W} \left[ \text{tg}(\tilde{k}l + \varphi) - K_{CB}^2 \right]^{-1} \right\}^2 \left[ \text{tg}(\tilde{k}l + \varphi) - K_{CB}^2 \right] \cos^2(\tilde{k}l + \varphi)}. \quad (13)$$

Из (13) ясно, что чувствительность  $F_m$  к изменению нагрузки максимальна тогда, когда параметры колебаний близки к резонансным, т.е. когда выражение в фигурных скобках (12) близко к нулю.

Амплитуда колебательного смещения выходного торца стержня

$$u_1(0) = u_0 \frac{\cos \varphi}{\cos(\tilde{k}l + \varphi)} = -\frac{F_m C_{CB}}{\omega M W \Delta} \frac{\cos \varphi}{\cos(\tilde{k}l + \varphi)} \quad (14)$$

зависит от нагрузки более сложным образом. Модуль переходного сопротивления из (13) и (14) равен

$$\left| \frac{F_m}{\omega u_1(0)} \right| = \frac{\omega^2 M W}{C_{CB}} \left| \frac{\left[ \text{tg}(\tilde{k}x_0 + \varphi) + \text{tg}\tilde{k}(l - x_0) - \frac{C_{CB}}{\omega W} \right] \cos(\tilde{k}x_0 + \varphi)}{\cos \varphi} \right|. \quad (15)$$

Если же стержень возбуждается при  $x_0 = l$  и  $C_{CB} \rightarrow \infty$ , что соответствует непосредственному возбуждению стержня без элемента связи, то, раскрывая в (15) неопределенность вида  $\frac{\infty}{\infty}$ , получаем:

$$\left| \frac{F_m}{\omega u_1(0)} \right| = \left| \frac{\omega M \cos(\tilde{k}l + \varphi)}{\cos \varphi} \right|. \quad (16)$$

Переходное сопротивление (16) минимально при  $\text{tg} \varphi = -\text{tg} kl$ , что соответствует известным результатам И.И. Теумина [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов, Л. Г. Расчет ультразвуковых концентраторов. Акустический журнал. – 1957. – Т. III, вып. 3. – С. 230–238.
2. Теумин, И. И. Ультразвуковые колебательные системы. – М.: Машгиз, 1959. – 332 с.
3. Казанцев, В. Ф. Источники ультразвука. – М.: Техполиграфцентр, 2010. – 252 с.

## **УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ**

**Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Тertiшников П.П., Генне Д.В.**  
*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, РФ*

Аннотация: статья посвящена решению проблемы санитарной обработки дезинфицирующими растворами населения, помещений различного назначения, транспортных средств и других объектов инфраструктуры. Существующее оборудование для этих целей имеет ряд существенных недостатков, связанных с формированием распыла с не оптимальными размерами капель. Для решения этой проблемы предложен высокоэффективный способ ультразвукового распыления дезинфицирующих жидкостей, обеспечивающих формирование капель с требуемым дисперсным составом для каждого вида обработки (люди, помещения различного назначения, открытые пространства). Показано созданное ультразвуковое оборудование, специализирующееся на обеспечении распыления жидкостей с необходимым размером частиц.

Ключевые слова: вирус, дезинфекция, ультразвук, ультразвуковое распыление, очистка.

Вирусы являются серьезной биологической угрозой существованию человечества. В этой связи превентивная санитарная обработка различными дезинфицирующими растворами остается на сегодняшний день эффективным средством борьбы с распространением вирусов.

На сегодняшний день эта задача решается путем распыления дезинфицирующих растворов, как показано на рисунке 1, при помощи специальных устройств, реализующих различные способы.



а) – гидравлический способ при помощи «поливальных машин»;  
б) – пневматический при помощи ручных распылителей.  
Рисунок 1 – Обеззараживание открытых пространств

Для перевода жидкости в капельное состояние используются гидравлический или пневматический способы распыления. При относительной простоте технической реализации указанные способы распыления имеют ряд серьезных недостатков:

– гидравлический способ формирует частицы с огромным спектром размеров – от самых «мелких» (в несколько десятков микрометров) до «крупных», размером более 1 мм. Основная масса антисептика расходуется на формирование «крупных» капель, которые не способны равномерно покрыть обрабатываемую поверхность. Для обеспечения требуемого эффекта увеличивается расход антисептических средств, которые «заливают» людей и улицы (рис. 1);

– пневматический способ распыления характеризуется малой производительностью процесса и созданием большого количества (облака) мелких капель (менее 5 мкм), которые не достигают обрабатываемых поверхностей, витая и высыхая в воздухе.

Таким образом, реализуемые способы распыления не только малоэффективны, но и не безопасны, поскольку наносят вред одежде и слизистым оболочкам - полости рта, глаз, носа. А по мнению Главного управления по здравоохранению РФ «Вдыхание большого количества паров алкоголя и других дезинфицирующих веществ может иметь немалые побочные эффекты и для населения».

Невозможность формирования необходимого количества частиц определенного размера с заданной производительностью не позволило до настоящего времени создать общепринятую методологию дезинфекции различных поверхностей, объектов и человека.

Поэтому актуальной является задача разработки и внедрения новых избирательных высокоэффективных способов распыления, способных обеспечить создание частиц аэрозолей оптимального размера и количества для безопасной обработки различных объектов, животных и человека [1].

К таким способам относится ультразвуковое распыление жидкостей. Принцип такого распыления заключается в воздействии ультразвуковыми колебаниями на пленку жидкости, расположенную на колеблющейся поверхности ультразвукового излучателя. На поверхности пленки жидкости возникают капиллярные волны, которые при достижении критической амплитуды (высоты) распадаются на капли.

Благодаря указанному механизму ультразвуковое распыление при высокой производительности процесса обеспечивает формирование практически монодисперсного спектра капель при самых низких, в сравнении с другими, энергозатратах.

Технология ультразвукового распыления обеспечивает управление размером формируемых капель за счет изменения частоты ультразвуковых колебаний, в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 2.

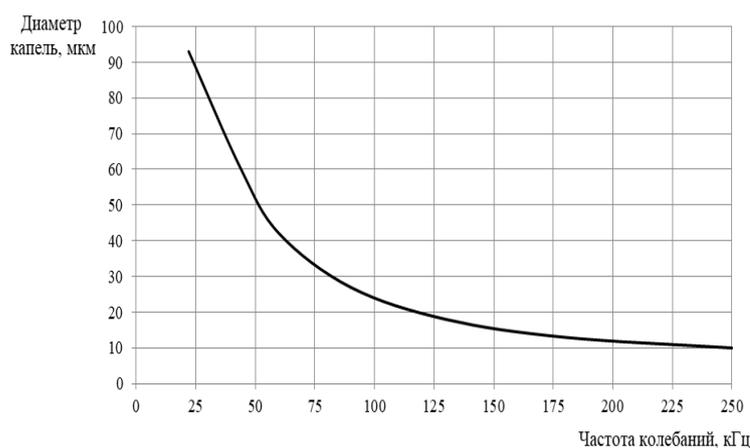


Рисунок 2 – Зависимость диаметра формируемых капель от частоты ультразвуковых колебаний

При этом отклонение диаметров капель от среднего значения минимальное из всех известных способов распыления. На рисунке 3 показано сравнение дисперсного состава двух способов распыления.

Таким образом, именно способность формировать «узкий» спектр диаметров капель позволяет не допустить образование опасного облака мелких капель (как у пневматического способа распыления) и исключить чрезмерное нанесение

антисептика на поверхности за счет «крупных» капель (как у гидравлического способа распыления).

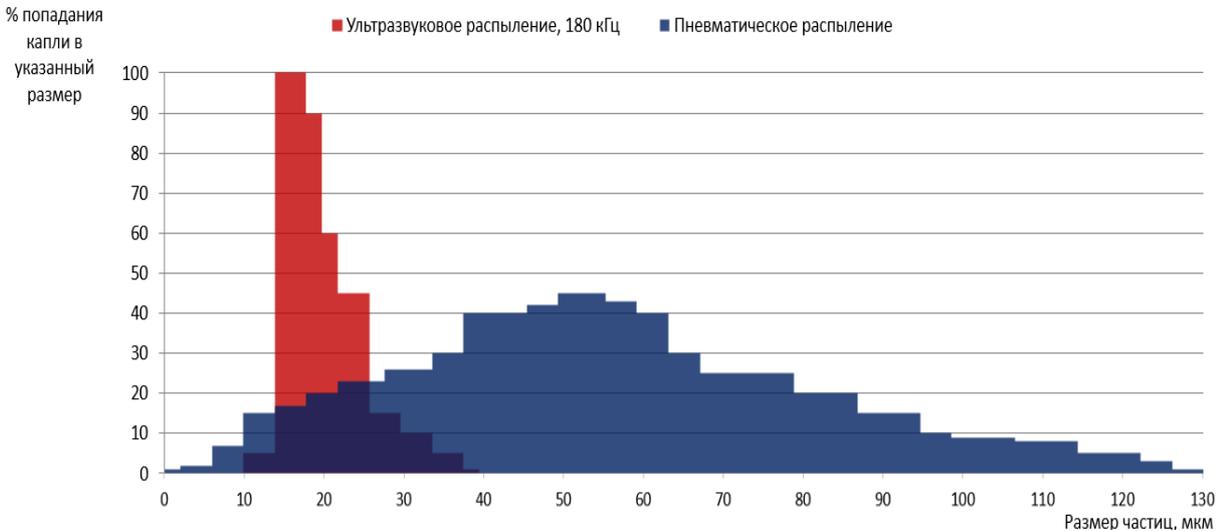


Рисунок 3 – Сравнение дисперсного состава капель, полученных ультразвуковым и пневматическим распылением

Анализ имеющихся данных по обеспечению дезинфекции различных объектов позволяет условно разделить все направления обработки от вирусов на следующие категории (в зависимости от характерных масштабов, расстояния от распылителя до объекта нанесения антисептика и соответственно необходимого размера формируемых капель жидкости):

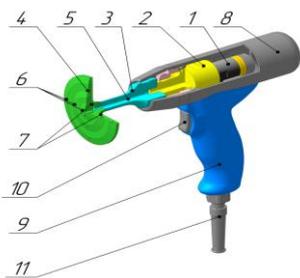
- при дезинфекции людей, прибывающих в производственные цеха, офисы, больницы, общественные места (транспорт наземный, подземный и воздушный), рестораны, наиболее эффективным будет распыление дезинфицирующих жидкостей с формированием частиц диаметром 10...35 мкм;
- при дезинфекции помещений, транспортных средств и т.п. – 25...70 мкм;
- при дезинфекции открытых пространств (дорог, зданий, павильонов, мест отдыха и т.п.) – 150...300 мкм.

Для практической реализации процесса дезинфекции, на основе уже разработанных ультразвуковых распылителей [2–5], могут быть использованы различные по конструкции устройства как для ручного распыления, так и для использования в мобильных передвижных устройствах.

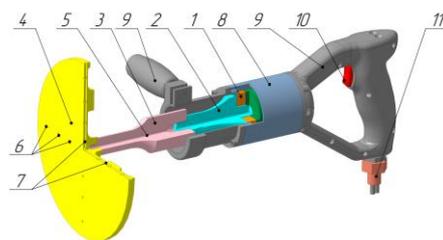
Далее представлены две конструкции ручных распылителей с различной производительностью для формирования частиц различных размеров. На рисунке 4 представлено устройство для формирования аэрозоля со средним размером частиц менее 50 мкм и производительностью не более 2 мл в секунду для обработки одежды людей, транспортных средств и небольших помещений.

На рисунке 5 представлено устройство для формирования аэрозоля со средним размером частиц менее 70 мкм и производительностью более 60 мл в секунду, предназначенное для обработки общественного транспорта, метро и помещений.

В представленных устройствах распыляемая жидкость находится в емкости-рюкзаке, который расположен за спиной оператора. На емкости с жидкостью установлена система подачи жидкости (насос и клапан). Также на емкости-рюкзаке установлен электронный генератор для питания ультразвукового распылителя. Электронный генератор питается от высокотоковых литий-ионных аккумуляторов.



- 1 – пьезоэлектрический преобразователь;  
 2 – бустерное звено;  
 3 – концентратор; 4 – изгибно-колеблющийся распылительный инструмент; 5 – внутренний канал для распыляемой жидкости;  
 6, 7 – внутренние каналы распылительного инструмента; 8 – корпус распылителя;  
 9 – рукоятка; 10 – курок для запуска распылителя;  
 11 – вывод кабеля питания, совмещенный с трубкой подачи распыляемой жидкости
- Рисунок 4 – Устройство для формирования аэрозоля со средним размером частиц менее 50 мкм и производительностью не более 2 мл в секунду



- 1 – пьезоэлектрический преобразователь;  
 2 – излучающая накладка пьезопреобразователя; 3 – концентратор;  
 4 – изгибно-колеблющийся распылительный инструмент дискового типа; 5 – внутренний канал для распыляемой жидкости;  
 6, 7 – внутренние каналы распылительного инструмента; 8 – корпус распылителя; 9 – рукоятка; 10 – курок для запуска распылителя;  
 11 – вывод кабеля питания, совмещенный с трубкой подачи распыляемой жидкости
- Рисунок 5 – Устройство для формирования аэрозоля со средним размером частиц менее 70 мкм и производительностью не более 60 мл в секунду

Представленные результаты многолетних разработок и исследований позволяют предложить высокоэффективное решение проблемы распыления дезинфицирующих жидкостей для санитарной обработки людей, помещений, транспортных средств и открытых пространств за счет применения ультразвукового распыления жидкостей. Созданные специализированные ультразвуковые аппараты способны обеспечить распыление с необходимой дисперсностью и производительностью дезинфицирующих жидкостей различной вязкости при наличии внесенных наночастиц серебра.

Использование преимуществ ультразвукового распыления, создание и применение на практике, основанных на этом принципе устройств, обеспечит надежную защиту людей, транспорта и помещений

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00121).**

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелев, В. Н. Ультразвук. Распыление жидкостей: монография / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, А. В. Шалунова; Бийск: Региональное отделение Алтайского края Общероссийской общественной организации писателей «Общероссийское литературное сообщество», 2017. – 272 с.
2. Сайт ООО «Центр ультразвуковых технологий» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://u-sonic.com>, свободный.
3. Ультразвуковой распылитель : патент RU на ИЗ 2 481 160: МПК В05В 17/06(2006.01) / Хмелёв В. Н., Шалунов А. В., Генне Д. В., Шалунова А. В., Голых Р. Н., патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ" (RU), заявка: 2011146974/05 от 18.11.2011. Опубликовано: 10.05.2013.
4. Ультразвуковая колебательная система для распыления жидкостей: пат. 2446894 Рос. Федерация: МПК (2006.01) В05В17/06 / Хмелев В. Н., Хмелев С. С., Хмелев М. В., Шалунов А. В., Генне Д. В., Цыганок С. Н., Барсуков Р. В. (Россия) патентообладатель: ООО «Центр ультразвуковых технологий» (Россия), заявка: 2010137457/05 от 08.09.2010. Опубликовано: 10.04.2012.
5. Хмелев, В. Н. Ультразвуковой распылитель вязких жидкостей / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов: сборник научных трудов / под ред. А. И. Громыко, А. В. Сарафанова. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 426–429.

## **УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС: ХАРАКТЕРИСТИКА И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

**Дежкунов Н.В., Минчук В.С., Гаврилюк В.А., Котухов А.В.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь, dnv@bsuir.by*

Ультразвуковые колебания широко используются для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях. Общеизвестно, что ключевым фактором при этом является кавитация – явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления ультразвуковой частоты [1]. Интенсивность воздействия кавитации на различные процессы (или другими словами – активность кавитации) определяется концентрацией кавитирующих полостей и эффективностью, с которой они преобразуют энергию ультразвука в другие виды энергии, в частности, тепловую и энергию ударных волн [1,2].

Многочисленными исследованиями показано, что активность кавитации не определяется однозначно интенсивностью ультразвука, сильно зависит от свойств жидкости, ее газосодержания, температуры, наличия зародышей кавитации и их концентрации, условий генерирования ультразвука, условий отражения на границах рабочей емкости и других параметров. Многие из параметров, влияющих на активность кавитации, могут неконтролируемо меняться во времени при воздействии ультразвуком на жидкости или на жидкообразные среды, например, за счет дегазации или в результате химических реакций. Все это в совокупности с неполнотой знаний о закономерностях генерирования кавитации в различных условиях является причиной недостаточно высокой воспроизводимости ультразвуковых технологических процессов.

В последние годы интенсивно исследуются возможности применения мощного ультразвука в кавитационном режиме в медицине и биологии в связи с обнаружением новых многообещающих эффектов. Это, например, подавление роста раковых клеток, выделение лекарств из носителей в течение заданного периода времени в заданном месте тела пациента. Проблема контроля активности кавитации становится особенно актуальной при проведении медико-биологических исследований и в связи с перспективой внедрения кавитационных технологий в медицинскую практику.

В настоящее время для оценки активности кавитации предложен ряд методов, например: по убыли массы эрозийных тестов, интенсивности кавитационного шума, интенсивности свечения, генерируемого кавитационной областью, – звуколюминесценции (ЗЛ) или по интенсивности рассеяния лазерного света. Вследствие того, что единица активности кавитации до настоящего времени не введена, известными методами активность кавитации оценивается в относительных единицах, а система обеспечения единства измерений отсутствует не только в странах СНГ, но и за рубежом.

Отсутствие поверяемых приборов для измерения активности кавитации является причиной того, что ряд потенциально эффективных технологий до сих пор не внедрен в практику в широких масштабах. Это обстоятельство является также причиной того, что результаты воздействия ультразвуком на процессы или объекты (особенно на биологические структуры), полученные в различных лабораториях при одинаковых или близких условиях, часто различаются довольно существенно и характеризуются низкой воспроизводимостью.

В лаборатории «Ультразвуковые технологии и оборудование» БГУИР создан спектрально-акустический кавитометр для измерений в низкочастотных ультразвуковых полях (20–100 кГц). Этот прибор по ряду параметров превосходит лучшие мировые образцы, что обеспечивает ему конкурентоспособность на мировом рынке. Оригинальные технические решения основаны на неизвестных ранее в литературе закономерностях генерирования кавитационных эффектов.

Для обеспечения воспроизводимости характеристик разрабатываемых датчиков кавитации и поверки кавитометров разработана установка – ультразвуковой кавитационный комплекс.

Схема комплекса представлена на рисунке 1. Он состоит из следующих основных узлов: 1 – блок генерирования ультразвуковой кавитации, состоящий из четырех субблоков 2, 3, 4 и 5: источников кавитации на частоты 22 и 44 кГц, (НЧ блок) 1 и 1,5 МГц (ВЧ блок); 6 – блок термостатирования; 7 – блок регистрации свечения, генерируемого кавитационными пузырьками; 8 – блок оптической регистрации вариаций плотности кавитационных полостей; включающий лазер и приемник лазерного излучения; 9 – система позиционирования датчика; 10 – блок регистрации и обработки акустического сигнала, генерируемого кавитационной областью – кавитационного шума (КШ), включающий широкополосный датчик кавитации 11, предусилитель 12, анализатор спектра кавитационного шума – кавитометр 13 и 14 – компьютер.

Контроль кавитационных режимов обеспечивается за счет одновременной регистрации трех ключевых кавитационных эффектов: кавитационного шума в диапазоне частот 1...20 МГц, рассеяния лазерного света кавитационной областью и звуколюминесценции.

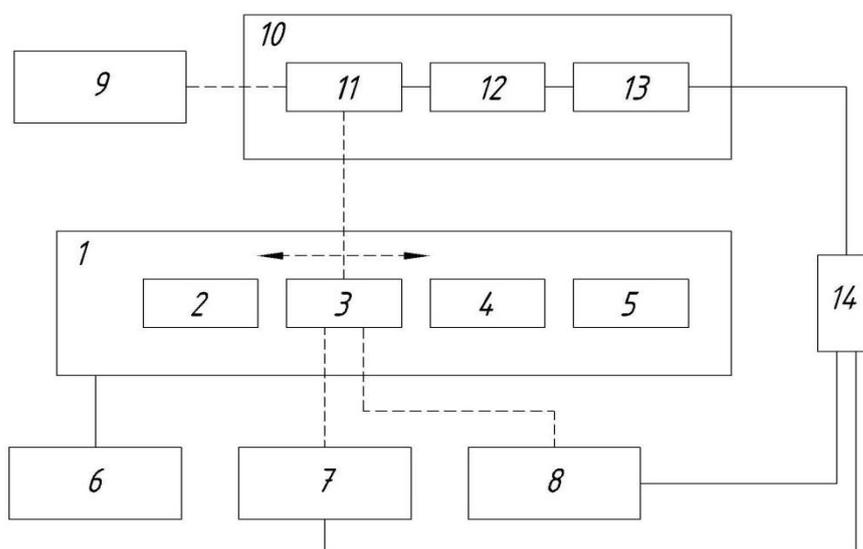


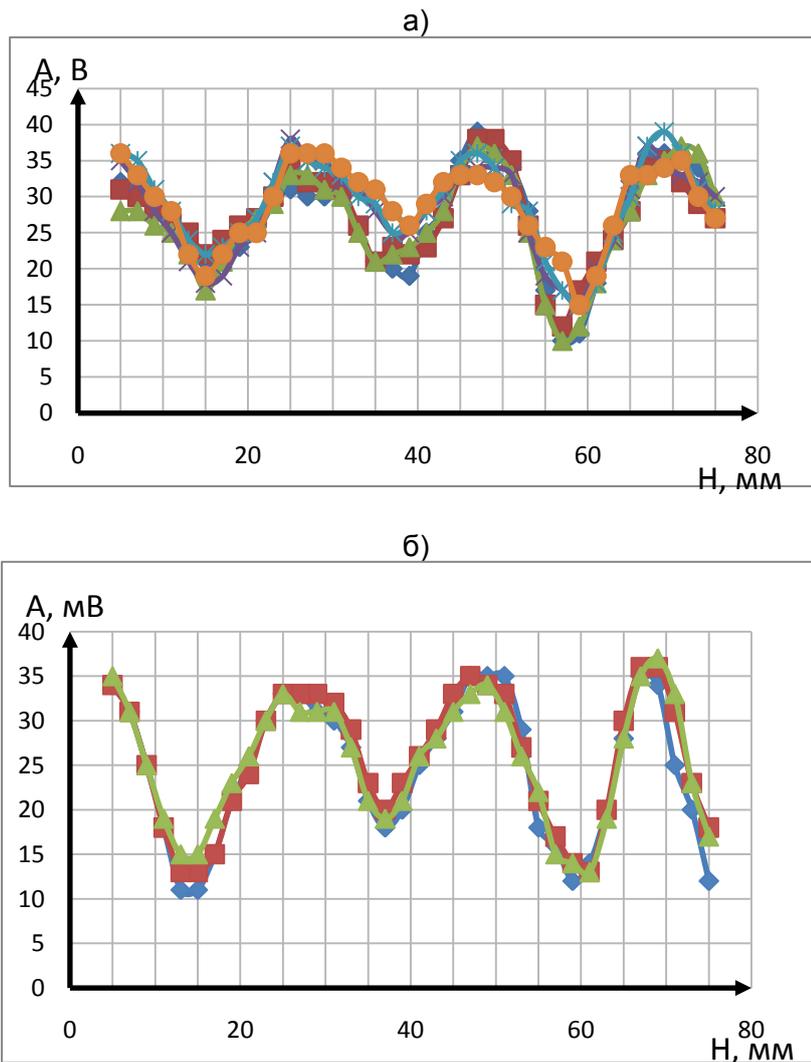
Рисунок 1 – Блок-схема ультразвукового кавитационного комплекса

Применение комплекса позволяет:

- унифицировать спектральные характеристики датчиков различных конструкций;
- обеспечить периодический контроль работоспособности (техническую поверку) датчиков и приборов для исследования кавитации;
- провести работы, необходимые для стандартизации измерений активности кавитации.

Кроме решения упомянутых выше задач установка обеспечивает возможность исследования кавитации и кавитационных эффектов в широком диапазоне частот и интенсивностей ультразвука в импульсном и непрерывном ультразвуковых полях. В настоящее время проводятся исследования по разработке кавитометра с высокой разрешающей способностью и высокотемпературных (до 1000 °С) датчиков кавитации.

В качестве примера на рисунке 2 приведены зависимости интенсивности выходного сигнала датчика кавитации от расстояния до излучателя в ультразвуковой ванне, полученные в ходе нескольких независимых экспериментов. Частота ультразвука – 33,4 кГц, при этом длина  $\lambda$  волны составляет примерно 44,9 мм, уровень жидкости над излучателем – 77 мм.



Рабочая жидкость – 5-й раствор этилового спирта в воде: а – свежая водопроводная вода, б – вода, предварительно дегазированная в течение 20 минут в использовавшейся ультразвуковой ванне

Рисунок 2 – Распределение активности кавитации вдоль оси излучателя

Видно, что после предварительной дегазации (рис. 2 б) разброс значений для независимых измерений существенно ниже, чем в растворе со свежей водопроводной водой (рис. 2 а).

В ходе испытаний комплекса получены результаты, представляющие значительный интерес с точки зрения уточнения представлений о механизме генерирования кавитационных эффектов. На основании сопоставления результатов синхронной регистрации сигналов датчика кавитации и фотоумножителя показано, что кавитационная область после включения ультразвука проходит четыре стадии развития кавитационной области, различающиеся динамикой изменения интенсивности звуколюминесценции и составом регистрируемых при этом спектров кавитационного шума. Сделан вывод о возможности идентификации стадий развития кавитационной области по спектрам кавитационного шума.

**В докладе представлены результаты, полученные в ходе выполнения работ по проекту «Разработать и изготовить ультразвуковой кавитационный комплекс (УЗКК)» ГНТП «Эталонны и научные приборы».**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация. – Москва: Наука, 2008.
2. Dezhkunov, N. V., Leighton, T. G. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. – V. 77, pp. 53–61.

## КОРРЕЛЯЦИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА

Минчук В.С., Перхунова А.Ю., Федоринчик М.П., Дежкунов Н.В.

УО «Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники»,  
Минск, Республика Беларусь

Оценка активности кавитации по убыли массы эрозионных тестов – один из наиболее известных и широко используемых методов [1]. Однако этот метод не поддается аппаратурной реализации, не позволяет обеспечить режим непрерывного контроля технологических процессов и не может быть использован в биологии и медицине. С другой стороны, в последние годы предложены методы, основанные на анализе спектральных характеристик кавитационного шума, разработаны и апробированы приборы, основанные на этом принципе [2, 3].

В данной работе приводятся результаты исследования связи кавитационной эрозии и интенсивности кавитационного шума в диапазоне частот от  $15f_0$  до 10 МГц, где  $f_0$  – частота ультразвукового поля. В качестве эрозионного теста использовались полоски алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, закрепленные между металлическими пластинами. В верхней пластине имеется отверстие диаметром 14 мм. За меру активности эрозии принята величина  $Q=1/T$ , где  $T$  – время полного разрушения образца. Эволюция разрушения тест-образца представлена на рисунке 1.

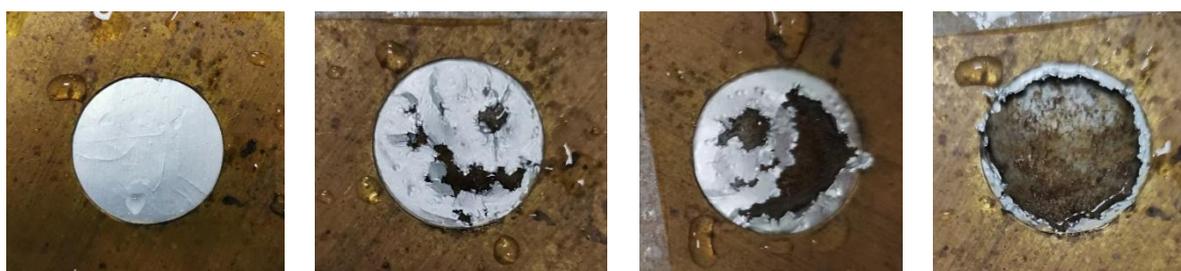


Рисунок 1 – Стадии разрушения тест-образца

Схема измерений представлена на рисунке 2.

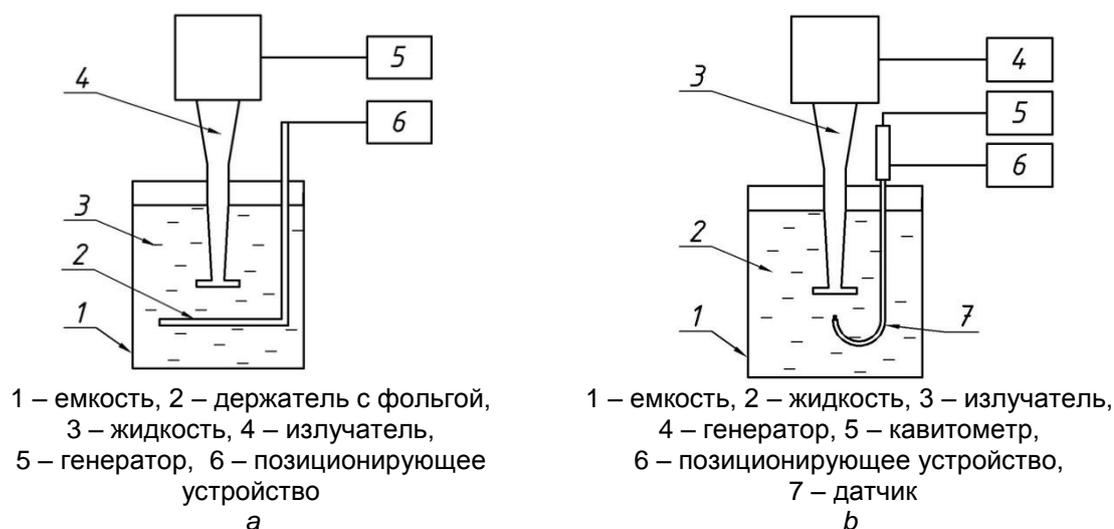


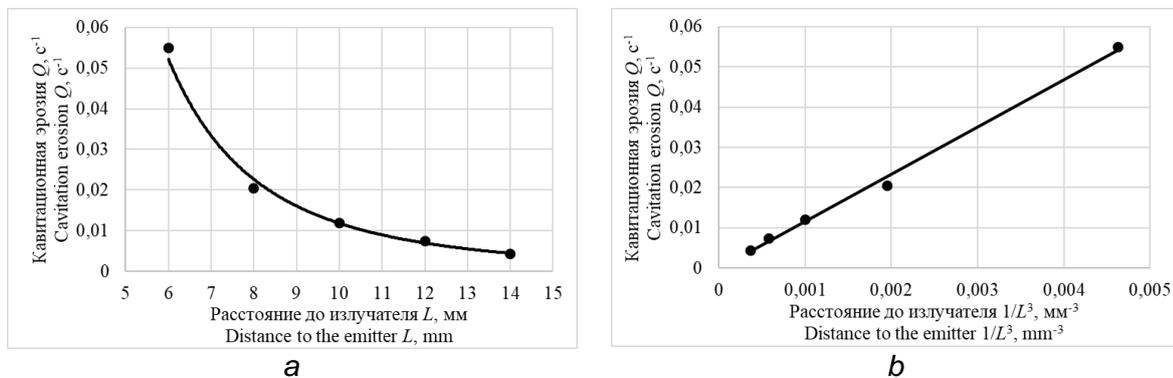
Рисунок 2 – Схема установки: *a* – эрозионный метод; *b* – анализ кавитационного шума

В прямоугольной ванне размером 240x180x100 мм, заполненной водой, размещается погружной излучатель. На заданном расстоянии от излучателя устанавливается тест-образец (рис. 2 а) или U-образный датчик (рис. 2 б). При регистрации кавитационного шума датчик устанавливается таким образом, чтобы его

торец находился на оси излучателя. Позиционирующее устройство позволяет перемещать датчик вдоль оси излучателя. Сигнал с датчика поступает на кавитометр, который фиксирует интенсивность кавитационного шума в упомянутом выше частотном диапазоне и передает на компьютер, где специальной программой сохраняется и визуализируется. Регистрация кавитационного шума осуществлялась с использованием кавитометра ICA-3M (БГУИР, Минск).

На рисунке 3 а представлена зависимость эрозионной активности  $Q$  от расстояния до излучателя  $L$ . Из данного графика следует, что эрозионная активность быстро уменьшается по мере удаления от излучателя. На рис. 3б эти же данные приведены в виде зависимости от  $1/L^3$ . Экспериментальные данные с высокой степенью точности укладываются на прямой линии, т.е. эрозионная активность кавитации обратно пропорциональна кубу расстояния от излучателя, где  $L$  выражено в миллиметрах.

Следует отметить, что при уменьшении  $L$  растет эффект, оказываемый акустическими течениями вблизи излучателя, которые могут отрывать большие части от тестового образца. Это приводит к большому разбросу данных, поэтому эксперименты по эрозии при  $L < 6$  мм не проводились.



А –  $Q$  от  $L$ ; б –  $Q$  от  $1/L^3$ ; амплитуда колебаний излучателя – 17 мкм

Рисунок 3 – Зависимость кавитационной эрозии от расстояния до излучателя

На рисунке 4 а представлена зависимость интенсивности кавитационного шума  $A$  от расстояния до излучателя  $L$ , на рисунке 4 б представлена та же зависимость, но в диапазоне  $L$ , в котором регистрировалась эрозия ( $a - 2 \leq L \leq 30$ ;  $b - 6 \leq L \leq 14$ ).

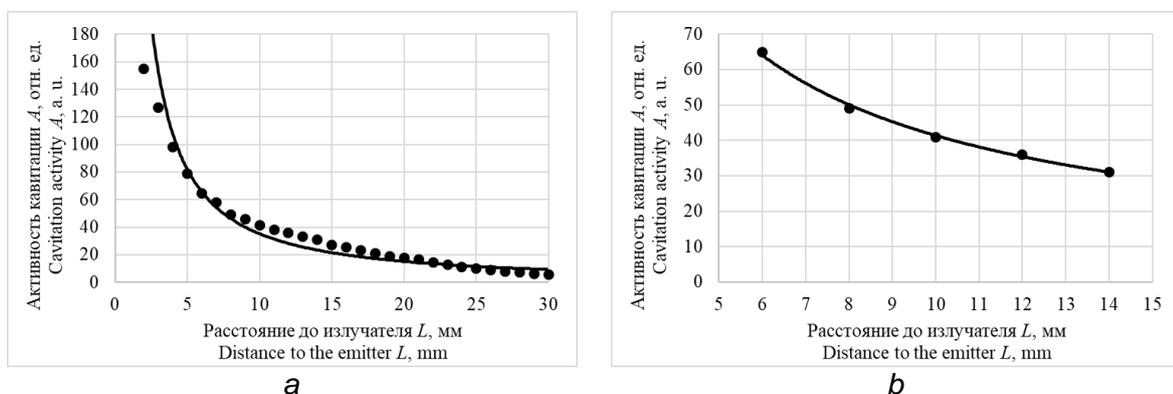
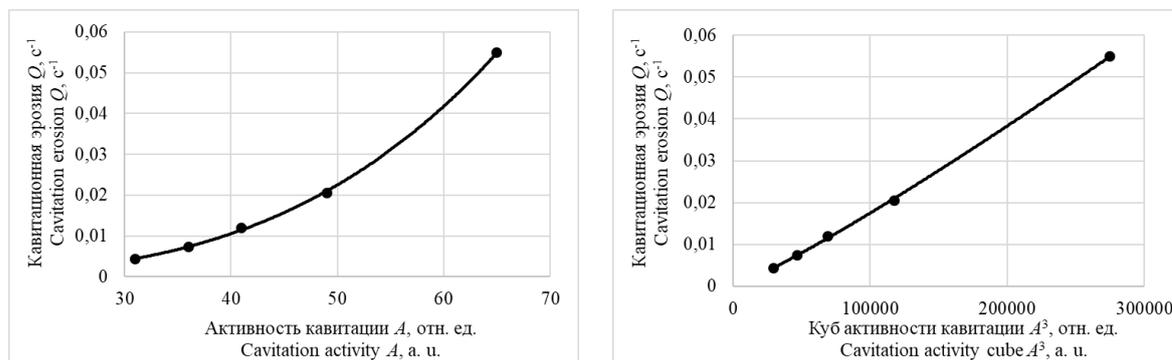


Рисунок 4 – Зависимость активности кавитации от расстояния до излучателя  $L$

Из рисунка 4б видно, что интенсивность кавитационного шума в данном диапазоне  $L$  зависит от  $L$  примерно как  $1/L$ .

На рисунке 5 представлены результаты сопоставления величин  $Q$  и  $A$  и взятых из данных на рисунках 3 и 4 для одних и тех же значений  $L$ . Видно, что интенсивность кавитационного шума в кубе и эрозионная активность кавитации (рис. 5 б) связаны практически линейно. Это указывает на возможность использования

параметра  $A^3$  для экспресс-оценки и контроля интенсивности эрозионного воздействия кавитации на твердые поверхности.



**a** **b**  
 $a$  – по оси  $x$  отложены значения  $A$ ;  $b$  – по оси  $x$  отложены значения  $A^3$   
 Рисунок 5 – Связь эрозионной активности от активности кавитации

Таким образом, установлено, что при диаметре излучателя меньше или порядка длины волны эрозионная активность уменьшается по мере удаления от излучателя как  $1/L^3$ , где  $L$  – расстояние от исследуемой точки кавитационной области до излучателя миллиметрах. Интенсивность кавитационного шума  $A$  при этом изменяется обратно пропорционально  $L$ . Предложен метод оценки эрозионной активности на основании спектрального анализа кавитационного шума.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация. – Москва: Наука; 2008.
2. Dezhkunov, N. V., Francescutto, A., Serpe, L., et.al. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development. *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2018. – № 40, pp. 104–109.
3. Котухов, А. В., Гаврилюк, В. С., Минчук, В. С. Дежкунов, Н. В. Комбинированный метод исследования акустической кавитации. *Доклады БГУИР*. 2020. – 18, № 4. – С. 80–88.

## METHOD FOR ESTIMATION OF ULTRASOUND EFFECT ON MASS EXCHANGE IN CLOSED CAPILLARY CHANNELS

Dezhkunov N.V.<sup>1</sup>, Calligaris F.<sup>2</sup>, Krasouski A.V.<sup>1</sup>, Kotukhov A.V.<sup>1</sup>

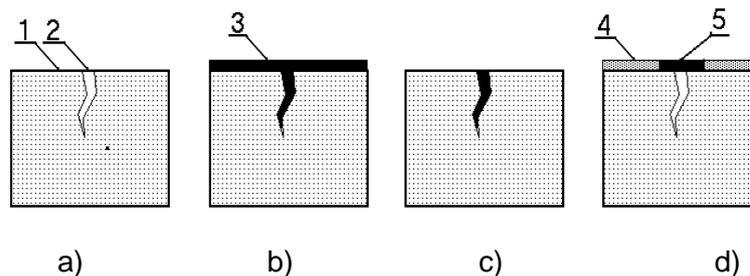
<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,

Minsk, Belarus, dnv@bsuir.by

University of Trieste, via A. Valerio 10,34127, Trieste, Italy

When processing products made of porous materials and obtaining such materials, in a number of cases, ultrasonic intensification of mass transfer in capillary channels is used. This paper proposes a new method for assessing the effectiveness of such an impact. This method uses inverse dye penetrant inspection technology.

The dye penetrant inspection (or capillary non-destructive testing) is employed to detect surface cracks in manufactured products. In practice, pieces or specimens are usually subjected to non-destructive testing after processing (mechanical, thermal or electrochemical). On processing of pieces the cavities of defects can be contaminated with oil, polishing paste, lubricating cooling liquid, corrosion products, etc. Therefore prior to testing the pieces are to be cleaned to decontaminate their surfaces and defect cavities. Next, the tracer fluorescent or dye-type liquid (penetrant) is imposed on the tested surfaces, which penetrates into defect cavities and partially or completely fills the latter (Fig.1b). Then penetrant is removed from the surface (Fig. 1c) and developer is deposited on the piece. This material helps give a contrast to the dye as well as extract the dye out of the cracks for visual examination under ultraviolet light (Fig. 1d).



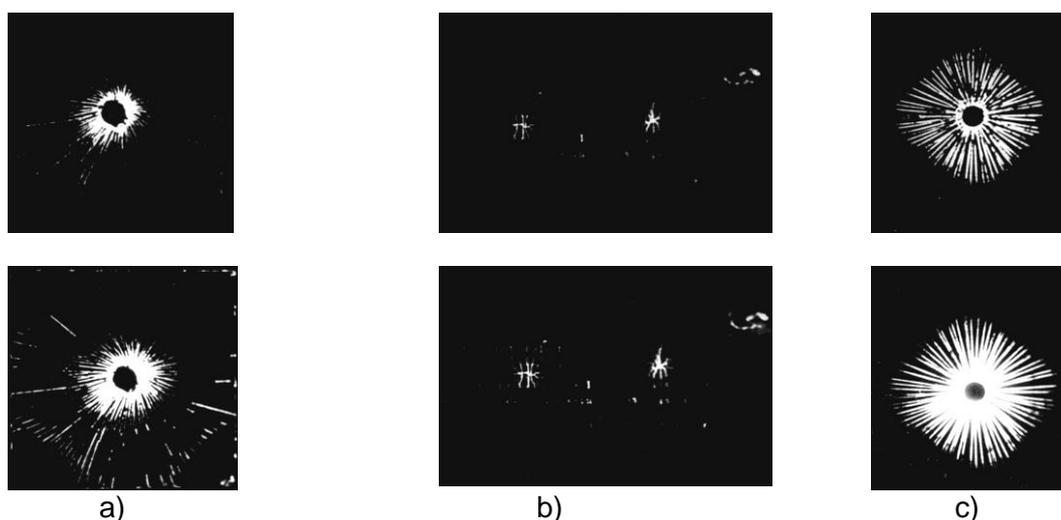
a) specimen 1 with a crack 2 prepared for testing (after cleaning); b) liquid penetrant 3 on the surface of the specimen and inside of the crack; c) specimen with the fluorescent penetrant in the crack after removing the penetrant from the surface of the specimen; d) developer 4 on the surface of the specimen to create enlarged trace 5 of the crack

Figure 1 – Illustration of the main dye penetrant (capillary) testing stages

In this work ultrasound was used in two stages of inspection: cleaning of specimens and penetration of fluorescent liquid into defects. The piezoceramic transducers 37,9 kHz resonance frequency with wave-guides were used to generate ultrasound. Experiments were performed at ultrasound intensities corresponding to maximum of ultrasonic capillary effect (UCE) what is an increase of the liquid rise in a capillary tube or depth of penetration of a liquid into a capillary under the action of ultrasound. It has been shown in previous works that cavitation plays an important role in the generation of the liquid flow directed into the capillary. For example, in the pre-cavitation conditions no rise of a liquid in the capillary under ultrasound was recorded. As the amplitude  $A$  of vibrations of the emitter is gradually increased, the meniscus level in a capillary increases abruptly at the moment a cavitation cloud appears at the capillary channel inlet. In general those of these liquids which exhibit higher SL intensity also show a greater ultrasonic capillary effect.

Impregnation of the defect cavities with the penetrants as well as cleaning of the defects were studied with the imitators of defects and on the optically transparent specimens. It has been shown that the depth of penetration of the working liquid into capillary cracks is increased under ultrasound in some cases significantly. Maximal effect is achieved at vibration amplitude of the radiating surface in the range 7-15  $A_{th}$ , where  $A_{th}$  is the vibration amplitude of the ultrasound source corresponding to the cavitation threshold in a working

liquid. The specimens were polished with the polishing paste for one minute prior to testing. The relative sensitivity of the testing  $S_{rel}$  was defined as the ratio of the number of the defects revealed with the method under consideration after polishing to the number of the defects revealed with the standard method on the same specimens after polishing. Figure 2 illustrates the improvement of the visualization of the defects on polished specimens without ultrasound (upper pictures) and after 3 min exposure under the ultrasound field at the radiator amplitude  $A = 12$  microns. Distance between the radiator and the specimen was 3 – 4 mm during experiments. As is seen from the figure the use of ultrasound improves quality of testing significantly.



Upper row - without ultrasound, lower row – with ultrasound

Figure 2 – Results of capillary testing of different specimens with capillary cracks on the surface specimens

The essence of the proposed inverse method is as follows. The capillary cavities of defects are filled with an indicator luminescent liquid. Then ultrasonic cleaning is performed at a certain selected exposure mode. It is clear that the more intensive the mass transfer in the capillaries, the less indicator liquid will remain in the channels and the worse the crack detection will be. In the ideal case, complete removal of the penetrant from the capillaries, no traces of defects will be found on the sample surface.

#### REFERENCES

1. Dezhkunov, N. V., Francescutto, A., Ciuti, P., Ignatenko, P. Proceedings of 5-th World Congress on Ultrasonics (WCU 2003), Paris, 2003, pp. 597–600.
2. Dezhkunov, N. V., Leighton, T. G. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, V. 77, pp. 53–61, 2004.

## **ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

**Меринов В.К., Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Григорьев А.Я.**

*Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого», г. Гомель, Республика Беларусь, vkozhusko@mail.ru*

Фрикционные композиты являются сложными высокотехнологичными изделиями, качество которых должно обеспечивать безаварийную эксплуатацию. Клеевое соединение металлического основания и фрикционного композита подвержено значительным динамическим нагрузкам. Контроль сплошности соединения традиционно выполняется ультразвуковыми методами, основанными на прямом и обратном пьезоэлектрическом эффекте для регистрации и возбуждения упругих импульсов. Достоинства традиционных ультразвуковых методов связывают с их относительной простотой и доступностью. При этом имеются и некоторые недостатки, такие как сложная для интерпретации форма импульсов, ограниченная рабочая полоса частот, необходимость механической подготовки поверхности и использование жидкостей, обеспечивающих акустический контакт между объектом контроля и преобразователем. Последние десять лет активно развиваются усовершенствованные ультразвуковые методы, например, лазерные оптико-акустические [1]. Лазерные импульсы длительностью порядка 10 нс возбуждают ультразвуковые импульсы длительностью несколько десятков наносекунд с ярко выраженной фазой сжатия. Спектр таких ультразвуковых импульсов охватывает полосу частот от 100 кГц до 100 МГц, что делает их перспективными для решения задач неразрушающего контроля и диагностики. В работе представлены результаты, показывающие возможности развития ультразвуковых методов для оценки качества склейки металлополимерных соединений посредством комбинации наносекундного лазерного возбуждения с пьезоэлектрическим преобразователем, регистрирующим акустический отклик.

Основная сложность ультразвуковой диагностики фрикционных композитных материалов связана с неоднородностью их структуры. Фрикционный композит состоит из компонентов с существенно отличающимися плотностями и акустическими импедансами. Так, например, акустические импедансы матрицы и металлических включений отличаются приблизительно в десять раз. При прохождении границ раздела происходит преобразование части продольных импульсов в сдвиговые импульсы, которые в свою очередь могут быть преобразованы в продольные и поверхностные волны. В результате в композите распространяются рассеянные ультразвуковые импульсы, отклоняющиеся от первоначального направления. Многократно повторяющееся рассеяние приводит к снижению амплитуды первичного импульса, и создаются условия для распространения во всех направлениях продольных и сдвиговых волн, что регистрируется преобразователем как микроструктурный шум. Таким образом, в композите распространяется существенная часть рассеянного излучения, а амплитуда прямого импульса значительно снижается.

Для решения поставленной задачи разработан и изготовлен пьезоэлектрический преобразователь на основе поляризованной керамики ЦТС толщиной 0,2 мм с линейными размерами чувствительного элемента менее 4 мм. В электрической схеме чувствительный элемент преобразователя представляет собой источник заряда, индуцированного в результате деформации керамической пластинки упругими импульсами. Для передачи электрического сигнала на вход цифрового осциллографа используется предварительный усилитель, работающий в режиме «холостого хода» и выполненный на печатной плате размерами 15x25 мм<sup>2</sup>. Схема усилителя реализована с применением пассивных элементов для поверхностного монтажа и одного операционного усилителя LMH6426, обеспечивающего усиление на 40 дБ в полосе до 15 МГц. Электрический сигнал преобразователя передается на вход цифрового запоминающего осциллографа с аналоговой полосой не менее 50 МГц.

В основе подхода лежит возможность облучения поверхности контролируемого изделия через прозрачную кварцевую трапециевидную призму. В качестве источника оптического излучения использован лазер производства LOTIS Tii модели LS-2131M-10, работающий в режиме модулированной добротности. Энергия в импульсе составляет порядка 10 мДж и длительность лазерных импульсов 12–15 нс. Излучение лазера проходит через боковую поверхность призмы в соответствии с изображением на рисунке 1а. Поглощение излучения с длиной волны 532 нм происходит в тонкой поверхностной области толщиной не более 20 нм. Энергия лазерного импульса (менее 10 мДж) и диаметр пятна (~ 5 мм) определяют плотность мощности на границе раздела между призмой и металлическим основанием. Оценки дают значение для плотности мощности немногим более 5 МВт/см<sup>2</sup>. Данное значение в четыре раза меньше порога абляции (20 МВт/см<sup>2</sup>), характерного для большинства металлов. Поглощённая энергия создаёт источники тепла, за время действия лазерного импульса тепло распространяется в объём металла на глубину не более 1 мкм, таким образом происходит быстрый приповерхностный нагрев области в форме тонкого диска с диаметром, сопоставимым с диаметром лазерного пятна. Возникающие термоупругие напряжения наиболее эффективно возбуждают импульс продольных ультразвуковых волн, которые распространяются в объём металла. Ультразвуковой импульс имеет длительность порядка нескольких десятков наносекунд и является широкополосным. Затем происходит отражение части импульса на границе клеевого соединения и распространение через границу раздела с призмой к пьезоэлектрическому преобразователю. Оценки эффективности оптико-акустического преобразования дают значение ~ 0,5 Па/(Вт/см<sup>2</sup>), и, соответственно, максимальную амплитуду импульса давления порядка 2,5 МПа. Преобразователь позволяет выполнять регистрацию широкополосных ультразвуковых импульсов в полосе от 100 кГц до 15 МГц по уровню 0,1, что проверялось измерениями в пластике и дюралюминии.

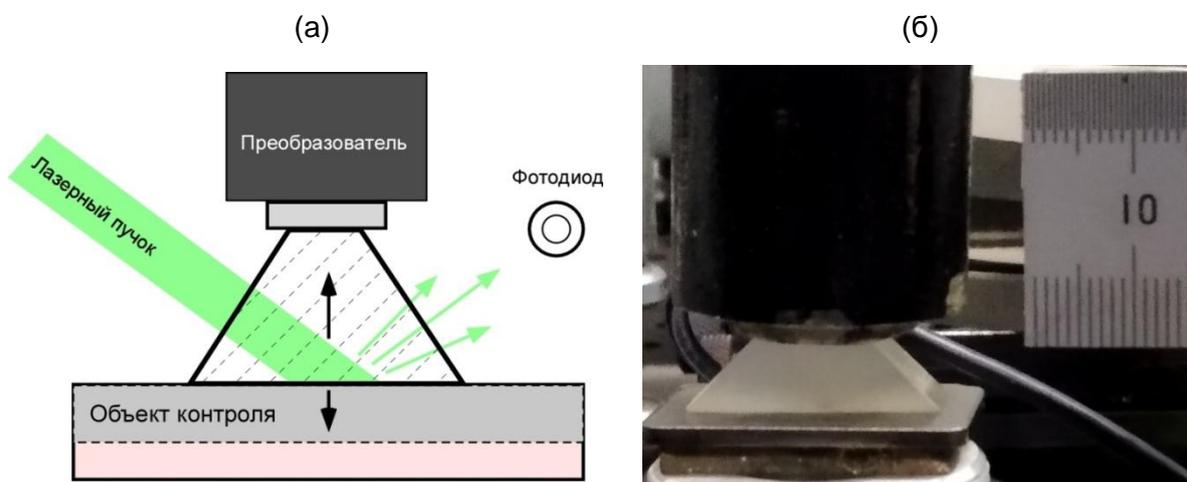


Рисунок 1 – Слева (а) схема проведения диагностики с применением оптико-акустического преобразования в режиме регистрации обратно-рассеянных ультразвуковых импульсов. Справа (б) изображение пьезоэлектрического преобразователя, трапециевидной призмы и фрикционного композита

Измерения выполняются в режиме регистрации обратно рассеянного ультразвука сканированием по поверхности металлического основания. Триггер осциллографа синхронизован с лазерным импульсом и приблизительно через 1,44 мкс преобразователь регистрирует ультразвуковой импульс, возбуждаемый на границе раздела призмы и металлического основания, данная задержка связана с пробегом ультразвука через кварцевую призму высотой 8 мм. Время пробега ультразвукового импульса по удвоенной толщине металлического основания установлено и составляет приблизительно 610 нс. Вертикальными стрелками на рисунке 2 отмечены отражение от склейки металлического основания с фрикционным композитом и последующие «эхо»-сигналы. Отметим, что отражение от материала с меньшим акустическим

импедансом меняет фазу первичного импульса на фазу с противоположным знаком. При отражении ультразвука в металлическом основании уменьшается полный размах амплитуды «эхо»-сигнала.

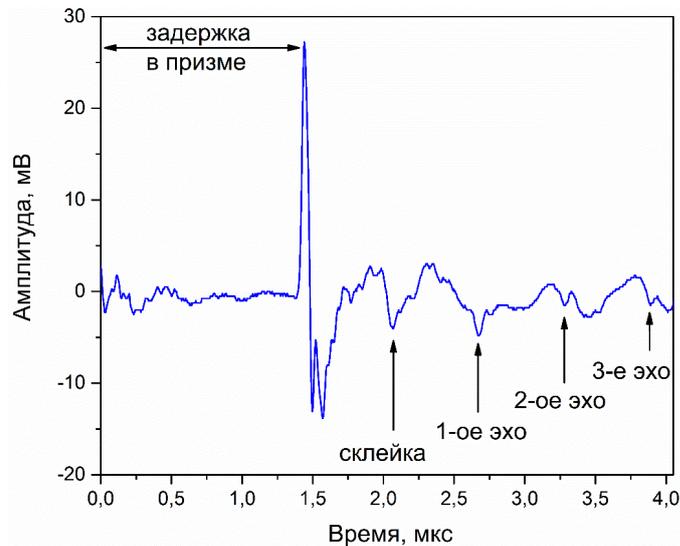


Рисунок 2 – Опико-акустический сигнал, измеренный в режиме регистрации обратно рассеянного ультразвука

Адгезионный слой обеспечивает акустический контакт между пластиной и фрикционным композитом. В случае некачественного соединения, и тем более в отсутствие клеевого слоя, зондирующий импульс полностью отражается от нижней границы металлического основания, и в этом случае уменьшение амплитуды «эхо» сигналов происходит медленнее. Оценка минимального поперечного размера дефекта сплошности соединения даёт значение 5 мм, что в основном определяется размером чувствительного элемента преобразователя. При этом продольное разрешение составляет ~0,2 мм, что определяется верхней границей рабочей полосы частот преобразователя (15 МГц по уровню 0,1) и связано в свою очередь с толщиной ЦТС пластинки. В заключении отметим, что разработанный макет экспериментальной установки может быть использован для проведения опико-акустической диагностики качества склейки металлического основания с фрикционным композитом и других металлополимерных соединений.

**Работа выполнена при поддержке Государственного Комитета по Науке и Технологиям в рамках конкурса с Республикой Узбекистан, проект T19UZBG-010.**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколовская, Ю. Г. Лазерный опико-акустический метод количественной оценки пористости углепластиков на основе измерения их акустического импеданса / Ю. Г. Соколовская, Н. Б. Подымова, А. А. Карабутов // Акуст. журн. – 2020. – Т. 66, № 1. – С. 86–94.

## ACOUSTIC COMPOSITES BASED ON BUCKWHEAT HUSK AND EPOXY RESIN

<sup>a)</sup>Kozhushko V.V., <sup>a)</sup>Bukharov S.N., <sup>a)</sup>Tuleika A.S., <sup>a)</sup>Sergienko V.P., <sup>b)</sup>Alexiev A.R.

<sup>a)</sup> *The State Scientific Institution «V.A. Belyi metal-polymer research institute of National Academy of Sciences of Belarus», Gomel, Republic Belarus, vkozhushko@mail.ru*

<sup>b)</sup> *Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

A high level of noise on the streets of cities and in industrial premises negatively affects a person, namely his health and emotional state, therefore, reducing the levels of noise exposure is an urgent task to ensure comfortable conditions for the population of cities. The development of measures aimed at reducing the noise safety of residential and industrial premises, as well as reducing sound pressure levels in the transport industry is an important economic and social task. Developed countries pay considerable attention to solving this problem. From the point of view of materials science, work is being intensively carried out to create composite materials and noise-reducing structures that isolate noise sources and reduce its level in rooms [1].

Acoustic composites are artificial materials that form the basis for the manufacture of noise-reducing structures of building structures and vehicles, interior panels and linings of the engine compartment, to protect service personnel from the noise of technological equipment installed in closed industrial premises. A distinction is made between acoustic materials with sound-absorbing and sound-insulating properties. Sound-absorbing materials are characterized by porosity and airflow to reduce re-reflections inside the room, while sound-insulating materials should reflect the acoustic waves incident on them to a greater extent and, thereby, prevent the passage of sound to the protected object. Traditionally, openly porous or fibrous composites are used as sound-absorbing materials. It is known that the absorption of sound frequencies in the range up to 500 Hz causes the greatest difficulties, since only an increase in the thickness of the material leads to an increase in the absorption coefficient in the low frequency range. The speed of air oscillation is minimum at a rigid wall and maximum at a distance equal to a quarter of a wavelength. To effectively use the sound-absorbing material, it must be placed at a certain distance from the rigid wall, where the vibration velocity of the particles, and therefore the amplitude losses, will be higher. This approach is well known and finds application in the acoustics of large rooms and halls.

Sound insulation solves the problem of maximum reflection of acoustic waves in a wide frequency range, which is achieved by increasing the acoustic impedance of the material used, while the limiting factors are its density, which determines the weight of the construction and the cost of the proposed solution. The ideal material seems to be a material that has both high values of the coefficient of sound absorption and transmission loss, which is difficult to implement in practice.

The development of improved composite materials for solving the problems of sound insulation and sound absorption is an urgent and practically important direction of research. Serious concerns about environmental changes affecting the climate are prompting researchers to search for fillers and plant-based fibers that compete in terms of sound absorption, density and biodegradability with known synthetic fibers such as mineral and glass fibers. In addition to fibers, it is possible to use other materials of plant origin: stems and fruit shells. So, for example, the production of a ton of buckwheat gives 200 kg of waste in the form of seed shells (husk), the use of which as a filler will make it possible to solve the problem of disposal. Untreated shells can be used as a sound-absorbing material, for example, in the case of floor filling, however, to expand the field of practical application, molding into slabs with preservation of the porous structure is required. A promising solution is the production of composites based on epoxy resin.

For the manufacture of experimental samples, buckwheat husk was used, provided by the branch of the Gomel Combine of Bread Products. The density of husk, kept at a room temperature of 20 ° C and a humidity of 40% for 7 days, is 145 kg / m<sup>3</sup>. The composites

were made on the basis of ED-20 epoxy resin, for which aminoacrylate was used. Epoxy resin provides a sufficiently high stiffness of the composite, is not affected by moisture, and does not emit harmful chemical compounds. For the purpose of subsequent measurements of sound insulation and sound absorption of composites, two molds were made of ABC plastic with an inner diameter of 100 mm and a height of 20 and 30 mm. Polymerization of the resin took place at room temperature, the mixture of husk and resin was kept in molds for more than 24 hours, after which the samples were removed and weighed. The density of the finished composites ranged from 400 to 700 kg / m<sup>3</sup>. An image of the samples is shown in Figure 1.



Figure 1 – Samples of composites for testing in impedance tube (interferometer)

Measurements of the acoustic properties of the composites were carried out in the laboratory of the MPRI of National Academy of Sciences of Belarus, accredited in the field of vibroacoustic measurements and tests (STB 1438-2004, ISO 10534-2: 1998, GOST ISO 10844-2017). To measure the sound absorption coefficient, we used an impedance tube with an inner diameter of 100 mm (type 4206) based on a spectrum analyzer and PULSE 7758 “Acoustic Material Testing” software from Bruel & Kjaer (Denmark). In this configuration, measurements were carried out in the frequency range from 50 to 1600 Hz. Sound absorption coefficient as a result of determining the frequency transfer function by a two-microphone method in accordance with ISO 10534-2. Sound insulation was determined by a four-microphone method in accordance with ASTM E2611-17. The results of measurements of sound absorption and sound insulation of the obtained composites are shown in Figure 2.

The sound absorption of composites changes significantly from low density composites (500 kg/m<sup>3</sup>) to denser specimen (700 kg/m<sup>3</sup>). The low density 20 mm thick composite demonstrates local maximum of absorption of about 0.90 at frequencies higher 1300 Hz. The 30 mm thick composite has local maximum of absorption at 1100 Hz while the absorption of the denser composite of the same thickness demonstrates local maximum of with the value near 0.6 at the frequencies about 450 Hz. It was above mentioned that the sound absorption is directly related to the porosity since the composites with high porosity (low density) have higher sound absorption in contrast to the materials with low porosity (high density). Thus, the density indirectly determines the efficiency of sound absorption and insulation. It also proves the necessity of good air flow resistance of material for performance sound absorption. The denser composite shows above 10 dB for the frequencies >300 Hz while lower density composite approaches only 6 dB in considered frequency range. The sound insulation of porous composite is worse but varying the density and the thickness it is possible to change the position of the local maximum of absorption and transmission loss.

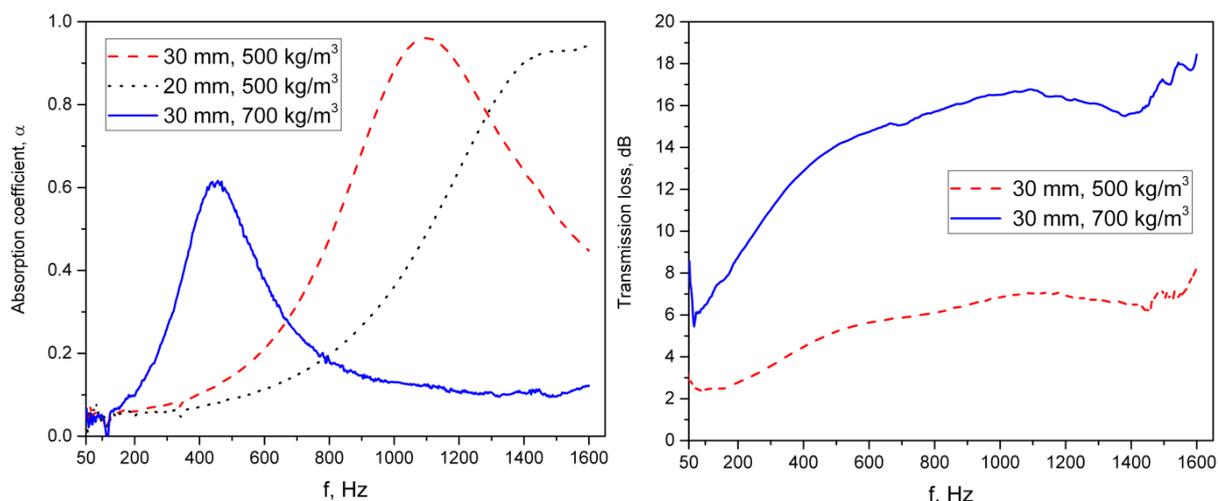


Figure 2 – Sound absorption coefficient  $\alpha$  (left) and transmission loss (right) of composites based on buckwheat husk and epoxy resin of different thicknesses and densities

The use of composites as shields for sound insulation of railway lines and sorting humps located within the boundaries of settlements. Spectral analysis of the noises (Fig. 3) registered during the braking of the cut showed the excess of the maximum permissible levels (MPL) of sound pressure established in the Republic of Belarus in the frequency band above 1 kHz. To solve the problem of sound insulation of residential buildings, it is possible to develop an acoustic composite for a noise protection shields, taking into account the spectral maxima of non-stationary noise.

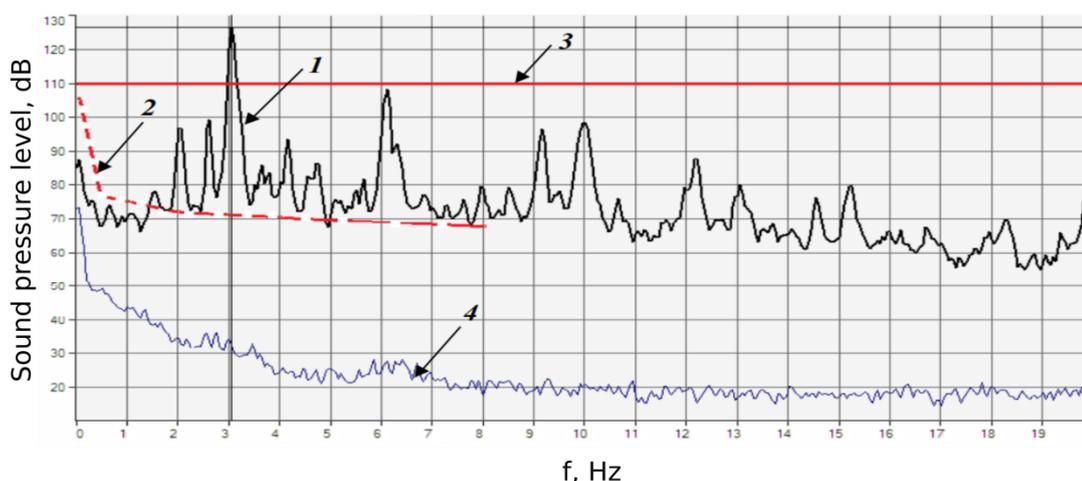


Figure 3 – Spectral characteristics of noise generated by car retarders RNZ-2 with standard brake tires when braking cuts of the sorting and dispatching yard of Gomel station: 1 – recorded noise levels; 2 – MPL for constant and equivalent non-constant noise; 3 – MPL for maximum noise value (110 dB); 4 – background noise level

***This research was sponsored by the NATO Science for Peace and Security Programme under grant SPS G5790.***

ЛИТЕРАТУРА

1. Bukharov, S. N. Acoustic composites and noise-reducing structures. Part I: Environmentally friendly components and nanofillers (A Review) / S .N. Bukharov [et al.] // Polymer materials and technologies. – 2021. – Vol. 7, No.1. – P. 6–22. [in Russian].

## **ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РУК ОТ ВИБРАЦИИ**

**Смирнов В.В.<sup>1</sup>, Сятковский А.И.<sup>2</sup>, Муравьев С.И.<sup>3</sup>, Хлопков Е.А.<sup>4,5</sup>, Вьюненко Ю.Н.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья,  
Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*ОАО «Пластполимер», Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия*

<sup>4</sup>*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия*

<sup>5</sup>*ООО «ОПТИМИКСТ ЛТД», Санкт-Петербург, Россия*

Рост быстродействия ручного инструмента, повышение его мощности, высокие прочностные характеристики новых материалов сохраняют актуальность вибрационной проблемы в технологических процессах металлургии, горнодобывающей промышленности, авиастроении и других отраслях промышленности. Не часто ее решение удается найти за счет создания новых конструкций механизмов или внедрения новых технологий. Поэтому необходимость в антивибрационных рукавицах и перчатках в настоящее время не исчезает.

Целью проведенных исследований было сравнение эффективности средств индивидуальной защиты (СИЗ) различных конструкций и определение факторов, влияющих на их характеристики. При этом отслеживали соответствие изучаемых СИЗ требованиям, изложенным в [1]. Измерение показателей эффективности защитных свойств проводили по методике, приведенной в работе [2].

В настоящее время на предприятиях России используются антивибрационные рукавицы и перчатки с разными типами защитных элементов (ЗЭ). Наиболее удобными в производстве являются рукавицы с поролоновыми антивибрационными вкладышами. Защитный элемент вырезается из листа толщиной 10 мм, легко вшивается в изделие. Эти средства индивидуальной защиты используются на предприятиях более 60 лет. Однако справиться с виброболезнью этими рукавицами не удалось. Открытая пористость поролона приводит к продавливанию вкладыша даже при малых усилиях (рис. 1 а), приложенных к инструменту. Поэтому эффективность такой конструкции рукавиц невелика.

Почти 100 лет в различных производствах используют антивибрационные рукавицы с трубчатыми вкладышами (рис. 1 б). В этих изделиях наблюдается 2 режима демпфирования вибраций. При небольших усилиях наличие воздушного зазора в трубке позволяет защитному элементу работать в режиме легкой сжимаемости. После деформирования трубок и смыкания их стенок под большой нагрузкой меняются упругие характеристики защитных элементов, их сжимаемость и это сказывается на эффективности СИЗ.

В рукавицах Вибротон, выпускаемых ИЧП Геворкяна, трубчатые вкладыши заменены на вставки из пористой резины (рис. 1 в). Это повысило деформируемость защитных элементов. В результате была повышена эффективность СИЗ в октавной полосе со среднегеометрической частотой 250 Гц (табл. 1).

В 90-е годы 20-го столетия в производстве антивибрационных перчаток стали использовать гелевые материалы. Желеобразный слой помещается в чехол из прочного упругого материала. Форма чехла задается таким образом, чтобы с наполнением его гелем образовывался защитный элемент, размещаемый в конструкции перчатки. Это позволило защитным свойствам перчаток Вибрагард (фирма Ansell) и Вибростат (фирма «ХК «Зеленый Берег XXI») превзойти характеристики ряда моделей антивибрационных рукавиц (табл. 2).

Одновременно с разработкой гелевых защитных элементов возникла идея объединения упругих пористых материалов и вязких желеобразных пленок в конструкции комбинированных антивибрационных элементов. Были разработаны серии моделей рукавиц «Турбо» и перчаток «НТОТ». В этих конструкциях использовали упругие элементы из вилатерма, изонела, пенополиуретана и термопластичную пленку ВПС 2,5. На рисунке 1 д приведена схема работы этих антивибрационных конструкций. Наличие различных моделей дало возможность расширить выбор защитных средств и тем самым повысить их эргономичность в конкретной технологической операции. Кроме этого, точные данные о вибрационных характеристиках ручного инструмента позволяют определить и СИЗ с максимальной эффективностью защиты. На рисунке 2 приведены октавные спектры 3 машин: рубильного молотка Р15, триммера Husqvarna 525 и электрошлифовальной машины ЭШМ 1.1. По методике, изложенной в [3], и данным о защитных свойствах перчаток, приведенных в таблице 2, были рассчитаны уровни вибрационного воздействия указанных изделий на руки операторов. Результаты расчетов представлены в таблице 3. Вычисления показали, что максимальный уровень защиты при работе с ЭШМ 1.1 будет обеспечен перчатками Вибростат 03. Такое же значение скорректированного уровня виброскорости достигается использованием модели НТОТ Лорд. Расчеты показали, что эта конструкция перчаток оказывается наиболее эффективной при работе с триммером.

В работе с рубильным молотком все варианты защитных средств близки по своей эффективности, и ее величина варьируется от 0,6 дБ до 0,8 дБ. Вычисления показали, что существенный уровень защиты в работе с молотком могут обеспечить лишь рукавицы Турбо Донбасс. Из расчетов следует, что применение этой модели позволяет ожидать снижения вибровоздействия на руки операторов более чем на 2 дБ.

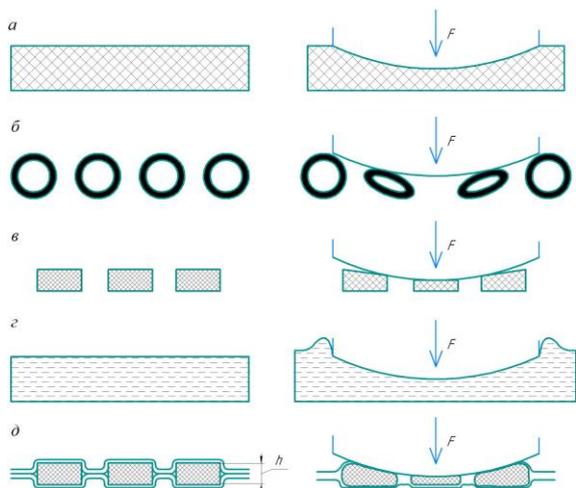


Рисунок 1 – Схема поведения упругодемпфирующих виброзащитных элементов при нагружении: а – с открытой пористостью; б – трубочатой формы; в – с открытой пористостью и повышенной плотностью; г – с гелевой основой; д – из комбинации слоев вязких и упругих материалов

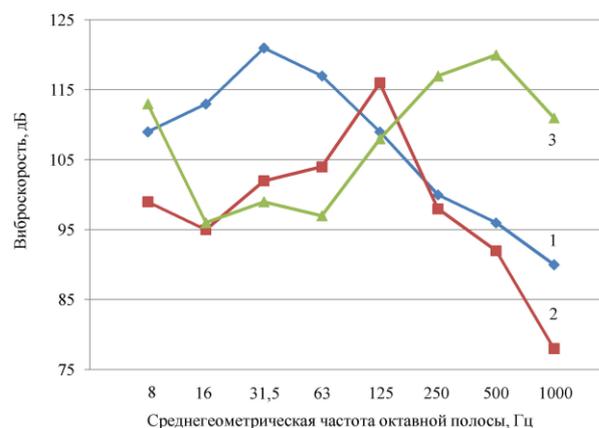


Рисунок 2 – Характеристики вибрации ручного инструмента: 1 – рубильный молоток Р15; 2 – триммер Husqvarna 525; 3 – электрошлифовальная машина ЭШМ 1.1

Важным моментом в использовании антивибрационных рукавиц и перчаток является вопрос об эволюции защитных свойств СИЗ в процессе их эксплуатации. Опрос рабочих на одном из предприятий авиационной промышленности показал, что при умеренных нагрузках перчатки НТОТ 3 могут использоваться до полугода. При этом, по их субъективному мнению, практически полностью сохраняются эргономические и защитные свойства СИЗ.

Таблица 1 – Эффективность защитных свойств антивибрационных рукавиц различных конструкций при усилении нажатия 100 Н

Объект	ЗЭ	Эффективность защитных свойств, дБ в октавных полосах частот, Гц						
		8;16	31,5	63	125	250	500	1000
ГОСТ 12.4.002-97 Тип 2а	до 8 мм	1,0	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Респ. Беларусь	а	1,0	2,0	2,0	3,0	5,0	6,0	8,0
Вибротон	в	1,0	2,0	2,0	4,0	8,0	9,0	9,0
Восток-Сервис, Спецкомп.	б	1,0	2,0	2,0	4,0	5,0	8,0	10,0
Турбо Онега	д	1,0	2,0	3,0	5,0	8,0	10,0	11,0
Турбо Сибирь	д	1,0	2,0	3,0	4,0	7,0	10,0	12,0
Турбо Классик	д	1,1	2,3	2,8	4,6	6,2	9,3	10,2
Турбо Донбасс	д	1,0	3,0	4,0	6,0	8,0	11,0	12,0

Таблица 2 – Эффективность защитных свойств антивибрационных перчаток различных конструкций при усилении нажатия 100 Н

Объект	ЗЭ	Эффективность защитных свойств, дБ в октавных полосах частот, Гц						
		8;16	31,5	63	125	250	500	1000
ГОСТ 12.4.002-97 Тип 2а	до 8 мм	1,0	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
X-MARINA	в	1,0	1,8	2,0	4,0	4,5	5,8	13,6
TEGERA	в	1,0	2,0	2,0	3,0	5,0	8,0	9,0
Вибрагарт	г	1,2	2,0	2,1	4,0	4,5	7,5	9,1
НТОТ АМИД	д	1,2	2,1	2,3	4,1	5,1	6,8	7,8
НТОТ 3	д	1,0	2,0	3,0	5,0	6,0	9,0	10,0
НТОТ Лорд	д	1,0	2,0	3,0	6,0	7,0	8,0	11,0
Вибростат 03	г	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	12,0

Таблица 3 – Виброскорость в определяющей октавной полосе  $L_v$  и скорректированный уровень вибраций при использовании перчаток различных конструкций  $L_{\text{кор}}$

Конструкция перчатки	P15		Husqvarna 525		ЭШМ 1.1	
	$L_{31,5}$ , дБ	$L_{\text{кор}}$ , дБ	$L_{125}$ , дБ	$L_{\text{кор}}$ , дБ	$L_{500}$ , дБ	$L_{\text{кор}}$ , дБ
Свободная рукоятка	121,0	122,0	116,0	117,0	120,0	122,0
Вибростат 03	119,0	121,2	111,0	112,0	110,0	116,0
НТОТ АМИД	119,0	121,2	112,0	113,0	113,0	118,0
TEGERA	119,0	121,3	113,0	114,0	112,0	117,0
НТОТ 3	119,0	121,2	111,0	112,0	111,0	117,0
X-MARINA	119,2	121,4	112,0	113,0	114,2	118,0
НТОТ ЛОРД	119,0	121,2	110,0	111,0	112,0	116,0
ВиброГарт	119,0	121,3	112,0	113,0	112,5	118,0
Допустимые уровни	109,0	112,0	109,0	112,0	109,0	112,0

Для объективной оценки эволюции свойств антивибрационных рукавиц были проделаны следующие эксперименты. Из партии рукавиц Турбо Донбасс случайным образом выбрали пару рукавиц. В этих рукавицах рабочий отработал 2 недели с рубильным молотком. После этого был проведен замер параметров защитных свойств (кривая 2, рис. 3). Исходные данные об эффективности указанной модели отражает кривая 1 на рисунке 3. Эффективность защиты рукавиц Турбо Донбасс снизилась во всех октавных полосах. И если на низких частотах потеря составляет 0,2 дБ, то в

диапазонах со среднегеометрическими частотами 500 Гц и 1000 Гц эффективность защиты снизилась на 3,6 дБ. При этом в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 Гц и выше защитные параметры рукавиц соответствуют требованиям ГОСТ 12.4.002-97, а на низких частотах уступают соответствующим величинам 0,1–0,2 дБ.

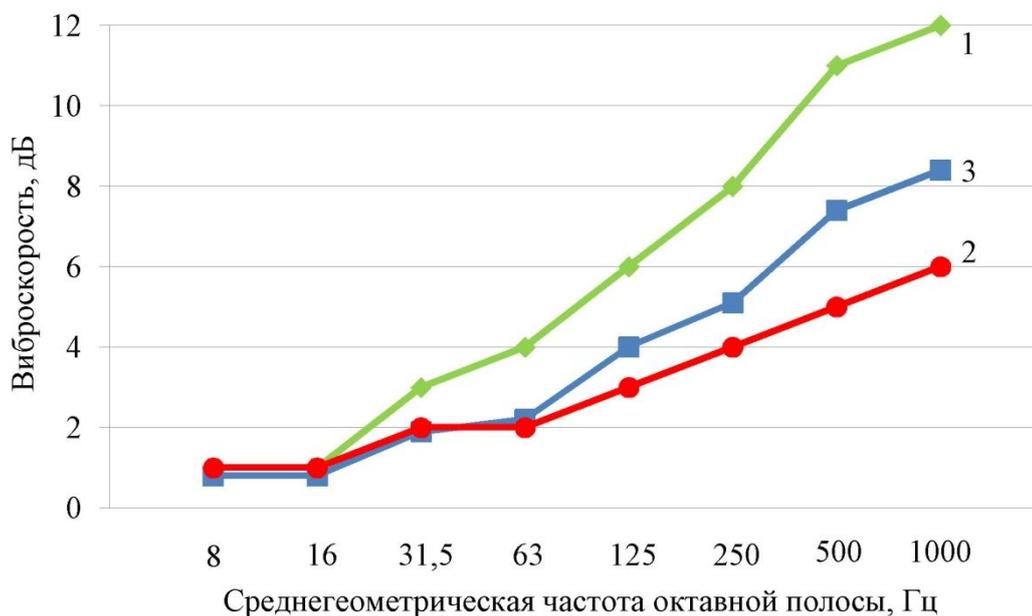


Рисунок 3 – Эффективность защитных свойств рукавиц Турбо Донбасс перед использованием в технологической операции (1), после двух недель работы с рубильным молотком (б), по ГОСТ 12.4.002-97 для изделий типа 2а (в)

Полученные результаты показали, что достижение максимальной эффективности применения антивибрационных перчаток и рукавиц зависит от правильного выбора модели для каждого частотного спектра вибраций технологического оборудования. Эксплуатация СИЗ в условиях умеренных нагрузок позволяет продлевать срок службы рукавиц и перчаток до шести месяцев. Большие нагрузки приводят к заметному снижению защитных характеристик СИЗ. Однако и в этих условиях рукавицы Турбо Донбасс с комбинированными антивибрационными вкладышами могут прослужить 3-4 недели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.4.002-97. ССБТ. Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний.
2. Бутковская, З. М., Смирнов, В. В. Основные критерии для гигиенической сертификации средств индивидуальной защиты рук от локальной вибрации // Медицина труда и промышленная экология. – 1999. – № 5. – С. 34–36.
3. Гигиенические требования к ручным инструментам и организации работ: СанПин 2.2.2.540-96 от 04.07.1996 г.

## НОВЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелев М.В., Нестеров В.А.

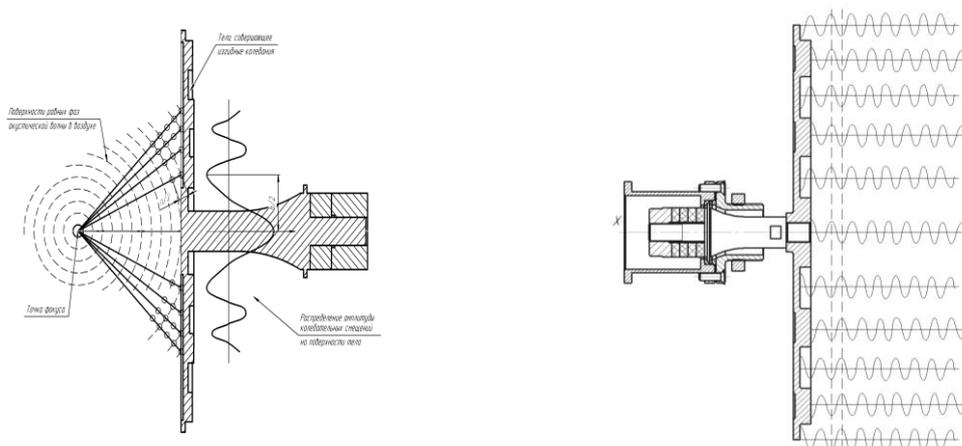
Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия  
ООО «Центр ультразвуковых технологий», г. Бийск, Россия, grey@u-sonic.ru

Одним из эффективных методов интенсификации технологических процессов, таких как сушка, коагуляция субмикронных частиц, пеногашение и других процессов в газовых средах или через нерезонансные промежутки, является воздействие ультразвуковыми колебаниями (УЗК) [1–3]. При этом необходимым условием реализации процессов является обеспечение интенсивности звукового давления не менее 130–160 дБ [4].

Формирование таких колебаний является сложной технической проблемой, поэтому задача создания специализированных УЗ аппаратов для интенсификации технологических процессов в газовых средах является очень актуальной и на ее решение направлены усилия многих исследователей и разработчиков.

### 1 Источники ультразвукового воздействия в газовых средах

Наиболее эффективными источниками колебаний высокой интенсивности в газовых средах в настоящее время являются пьезоэлектрические колебательные системы с излучателями в виде изгибно-колеблющихся ступенчато-переменных (по сечению) дисков или пластин (рис. 1) [5, 6].



1) фазированный фокусирующий излучатель

2) нефокусный излучатель с фазовыравнивающими элементами

Рисунок 1 – Излучение ультразвука в газовые среды

Фокусировка ультразвуковых колебаний в газовой среде позволяет достигать интенсивности звукового давления до 200 дБ. Такие значения интенсивности необходимы для реализации процессов пеногашения, когда в фокальном пятне идет разрушение образуемой пены.

Реализация процессов сушки и коагуляции происходит при интенсивностях до 160 дБ, поэтому используются УЗ излучатели с преимущественным излучением одной фазы колебаний, позволяющие создавать в газовой среде акустическое равномерное поле.

### 2 Аппаратные решения ультразвукового воздействия через газовые промежутки

Необходимость интенсификации технологических процессов посредством различных акустических полей (однородного и неравномерного), обеспечения необходимой и достаточной для реализации конкретного процесса интенсивности УЗ давления (от 130 дБ до 160 дБ), заданной частоты УЗ колебаний (от 18 кГц до 22 кГц)

привели к созданию УЗ аппаратов серии «Соловей». Часть таких УЗ аппаратов для воздействия при нормальных условиях представлена на рисунке 2.



1) УЗАГС-0,1/22-О: 120 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 105 мм



2) УЗАГС-0,2/22-О: 140 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 210 мм



3) УЗАГС-0,5/22-О: 150 дБ, 22 кГц, диаметр излучателя – 320 мм



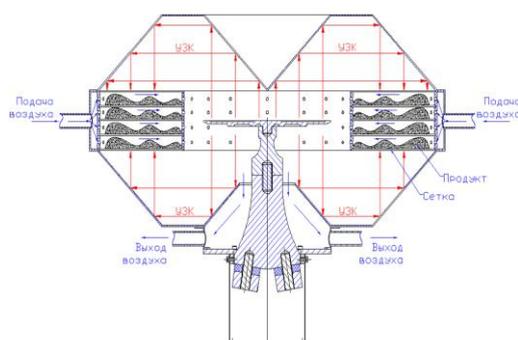
4) УЗАГС-0,6/18-О: 155 дБ, 18 кГц, диаметр излучателя – 360 мм

Рисунок 2 – УЗ аппараты для воздействия через газовые промежутки

### 3 Учет влияния внешних воздействий

Для максимально эффективного использования энергии создаваемых УЗ колебаний необходимо учитывать специальные условия их распространения. Это обуславливает необходимость разработки и применения специальных технологических объемов (камер).

На рисунке 3 показан УЗ аппарат для реализации процесса акустической сушки, в котором высушиваемый материал размещается в области наивысшей концентрации УЗ энергии. Такое решение позволило не только увеличить скорость протекания процесса акустической сушки, но и снизить нижнюю границу диапазона силы звукового давления, создаваемого излучателем до 125–130 дБ.



1) эскизная схема

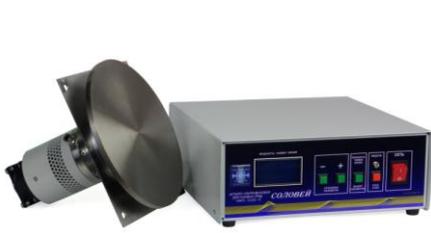


2) УЗС-1,2/27-О

Рисунок 3 – УЗ аппарат для реализации акустической сушки

При реализации процессов в условиях, отличных от нормальных по температуре, возникает необходимость в создании и применении специальных УЗ аппаратов.

Температура технологического процесса ограничена верхним значением 250–300 °С, так как при таких значениях материал диска – титановый сплав – теряет свои упругие свойства. Кроме того, для исключения перегрева пьезоэлектрического преобразователя применяют системы тепловой отсечки в виде проточных объемов между пьезоэлектрическим преобразователем и бустерным звеном УЗ колебательной системы (рис. 4).



1) УЗАГС-0,2/22-ОРв: 135 дБ, 22 кГц,  
диаметр излучателя – 205 мм, +80±10 °С



2) УЗАГС-0,3/22-ОРв: 140 дБ, 22 кГц,  
диаметр излучателя – 205 мм, +175±25 °С

Рисунок 4 – УЗ аппараты для воздействия при повышенных температурах

### **Выводы**

Созданные и представленные в работе УЗ аппараты обеспечивают интенсификацию технологических процессов в газовых средах за счет эффективного бесконтактного УЗ воздействия на различные технологические процессы, такие как коагуляция, сушка, пеногашение и т.п.

Для повышения эффективности ультразвукового воздействия при помощи созданных аппаратов в различных условиях используются специальные технологические объемы и устройства тепловой защиты пьезопреобразователей.

Разнообразие созданных аппаратов обеспечивает оптимальный выбор при решении различных технологических задач современных производств.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хмелев, В. Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, С. С. Хмелев, С. Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2015. – 688 с.
2. Хмелев, В. Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, К. В. Шалунова, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. Н. Сливин. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2010. – 228 с.
3. Хмелев, В. Н. Ультразвуковая коагуляция в скрубберах Вентури: особенности реализации и эффективность применения / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, С. Н. Цыганок, В. А. Нестеров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 128–139.
4. Хмелёв, В. Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия / В. Н. Хмелёв, А. В. Шалунов, Р. Н. Голых, К. В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья, 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.
5. Khmelev, V. N. Development of two-step centrifugal acoustic gas-purifying equipment / Khmelev V. N., Shalunov A. V., Nesterov V. A., Dorovskikh R. S., Kozhevnikov I. S. // В сборнике: 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM -2016). Conference Proceedings, 2016. – С. 264–268.
6. Хмелев, В. Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах / В. Н., Хмелев, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов, А. Н. Лебедев, С. С. Хмелев, А. Н. Галахов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 1. – С. 148–157.

## **ОТОБРАЖЕНИЕ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВЫХ ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

**Баглюк Г.А., Безымянный Ю.Г., Талько О.В.**

*Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины, г. Киев,  
Украина, gbag@ukr.net*

Акустические методы неразрушающего контроля зарекомендовали себя как высокочувствительный инструмент при исследовании различных свойств материалов.

В основе акустического методов диагностики состояния материала и оценки его свойств лежит физическая связь характеристик материала с параметрами упругой волны. В силу физической природы акустических полей их параметры непосредственно связаны с упругими и неупругими свойствами твёрдого тела, а опосредованно – с особенностями его строения.

Постоянная востребованность новых материалов со всё более уникальными свойствами предполагает соответствующее усложнение их состава и структуры, что, в свою очередь, требует синхронного развития методов контроля таких материалов.

Выявление адекватного отображения свойств гетерогенных материалов в параметрах акустических полей осложнено его многофакторностью, особенностями для отдельных групп материалов, необходимостью использования нетривиальных эмпирических приёмов. К факторам, влияющим на параметры акустических полей, относятся свойства и процентное содержание исходных компонентов, параметры технологических режимов получения материала, особенности его структуры. Влияние каждого из этих факторов можно выделить при правильной постановке акустического эксперимента. Решение разных задач относительно материала требует разных экспериментальных подходов. Гарантия отсутствия промахов и обеспечение достоверности при оценке конкретного свойства материала требует устранения мешающих факторов и обеспечения выбора наиболее чувствительных к искомому свойству материала параметров акустического поля.

Нами разработана методология обоснованного выбора параметров акустического поля для адаптации акустического эксперимента к особенностям конкретного материала и конкретной задачи, которую относительно него решают. В основе методологии лежат современные методы физического, структурного, акустического и математического моделирования, а также специальные методы обработки сигнала.

Создание методами порошковой металлургии композитов – одно из наиболее перспективных направлений удовлетворения потребностей общества в новых материалах специализированного назначения. Одним из наиболее эффективных процессов порошковой металлургии, обеспечивающих получение плотных (практически беспористых) изделий, в том числе и сложной формы, является горячая штамповка пористых заготовок. Этот процесс имеет особенности пластического течения пористых материалов, так как сопровождается необратимыми объемными изменениями. С точки зрения акустического контроля в таких материалах можно выделить такие нетривиальные моменты: использование большого числа исходных компонентов, изменение формы на разных стадиях изготовления материала, наличие пористости на ранних стадиях изготовления, повышенная вероятность появления дефектов и неоднородности структурного состояния по объёму изделия, анизотропия свойств – все эти особенности могут быть исследованы акустическими методами контроля.

Рассмотрим возможности использования акустических методов на примере обработки создания горячештампованных алюмоматричных композитов.

Структурную модель такого материала можно представить как гетерофазную нерегулярную систему, состоящую из смеси различных исходных порошков. Характерными размерами контролируемого объекта можно считать на макроуровне –

размеры образца (пусть  $l \sim 50$  мм), а на мезоуровне – размер порошка (пусть  $a_i \leq 100$  мкм). Материал может содержать поры и другие (пусть  $d_i \sim 100$  мкм).

В акустической модели (рис. 1) ставится в соответствие каждому размеру  $x$  (образца  $l$ , его элементов  $a_i$ , дефектов  $d_i$ ) его волновой размер  $x/\lambda$ , что позволяет путём выбора частоты ультразвукового зондирования исследуемого объекта ( $f$ ) с учётом скорости распространения упругой волны в соответствующем элементе ( $c_i$ ), или эффективного значения для всего образца ( $c_e$ ) адаптировать длину упругой волны  $\lambda$  к тому размеру, который соответствует задаче исследования:  $f=c/x$ .

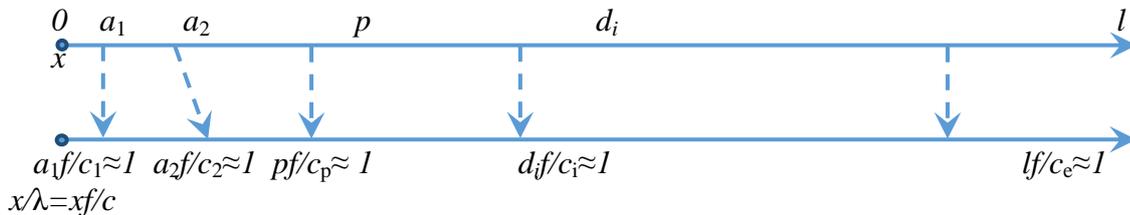


Рисунок 1 – Акустическая модель пористого порошкового материала с дефектами

Так, в соответствие акустической модели на частоте  $f=c_e/l$  работает резонансный ультразвуковой метод, который не может обеспечить адаптацию параметров акустического поля к структурным составляющим материала. Для достоверной оценки интегральных свойств материала необходимо обеспечить ультразвуковое зондирование образца, например, с помощью импульсного ультразвукового метода, на частоте длинноволнового приближения свойств гетерофазного материала. Длинноволновое приближение в случае однородного твёрдого тела определяется из условия  $\max\{a_i f / c_i, p f / c_p, d_i f / c_i\} \ll 1$ . При этом представительные для определения интегрального свойства размеры образца должны быть не менее репрезентативного объёма, т.е. в каждом направлении содержать не менее 100 частиц:  $l \gg \max\{a_i, p, d_i\}$ . В нашем случае, например, для исходных частиц из порошкового железа  $f \ll 60$  МГц,  $l \geq 10$  мм. В этом случае за счёт усреднения свойств на длине волны материал можно считать статистически однородным. Для исследования свойств элементов структуры с наибольшей чувствительностью параметров упругой волны необходимо обеспечить ультразвуковое зондирование образца, например, для анализа влияния исходных порошков, на частоте  $f \approx 60$ , а пористости – 3 МГц.

Физическую модель такого материала при длинноволновом приближении и представительности образца можно представить как статистически однородное квазиупругое анизотропное твёрдое тело, имеющее трансверсальную изотропию. Статистическая однородность позволяет применять к материалу методы усреднения по объёму (характеристик структуры, свойств, ...), в том числе длинноволнового. Квазиупругость позволяет использовать для характеристики материала скорость распространения и коэффициент затухания упругой волны. Трансверсальная изотропия позволяет перейти к математическому моделированию связи скорости распространения продольных ( $c_l$ ) и поперечных ( $c_t$ ) упругих волн с упругими постоянными материала:  $c_{xx}=(c_{lx})^2 \rho$ ;  $c_{xy}=(c_{lx})^2 \rho$  – в направлении штамповки и  $c_{yy}=(c_{ly})^2 \rho$  – в перпендикулярном.

Изменение формы образца на разных стадиях его изготовления, характерное для горячей штамповки, приводит к тому, что процессы деформирования проходят неравномерно по объёму. Это проявляется в неоднородности структуры и разбросе свойств внутри материала. Такие структурные особенности имеют, с точки зрения эксплуатации материала, особый интерес.

Нами разработана методика измерения скорости распространения упругой волны в различных участках образца для сопоставления изменения распределения неоднородности его свойств по объёму на стадиях формования материала с изменением его формы (рис. 2). Стрелками показаны направления прозвучивания. Отображение такого распределения в скорости распространения упругой волны показано на рисунке 3.

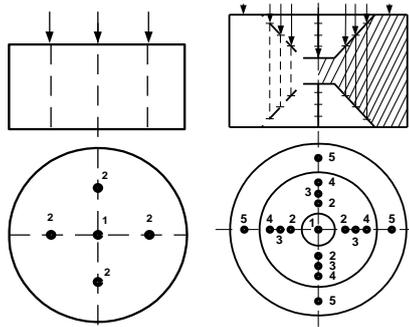


Рисунок 2 – Образцы для исследований

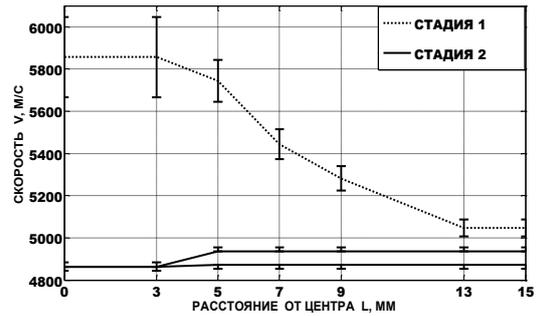


Рисунок 3 – Распределение скорости в образце

Отображение влияния свойств исходных компонентов и технологических режимов в параметрах упругих волн продемонстрировано на образцах алюмоматричных композитов системы Al-TiC, полученных горячей штамповкой с использованием разных технологических схем. Как видно, параметры упругой волны по-разному отображают различия в образцах. По результатам измерений образец №4 был отобран как дефектный. В остальных образцах были измерены упругие постоянные (рис. 5).

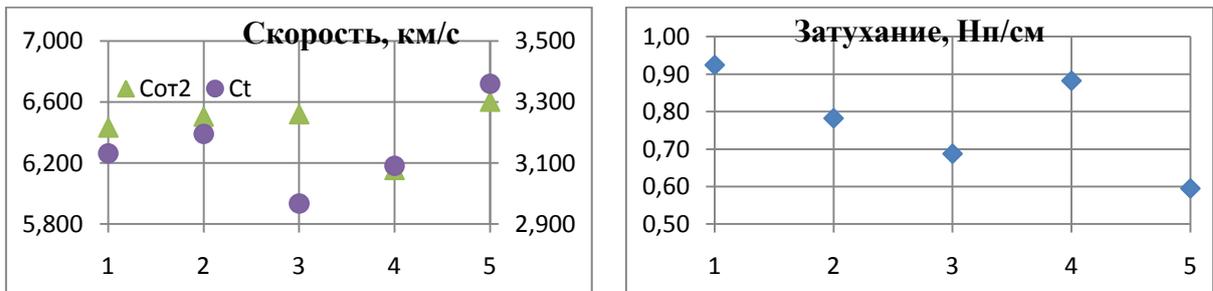


Рисунок 4 – Скорости распространения продольной (левая шкала) и поперечной (правая) упругих волн и затухание продольной упругой волны в образцах алюмоматричных композитов системы Al-TiC с различным составом и технологией получения

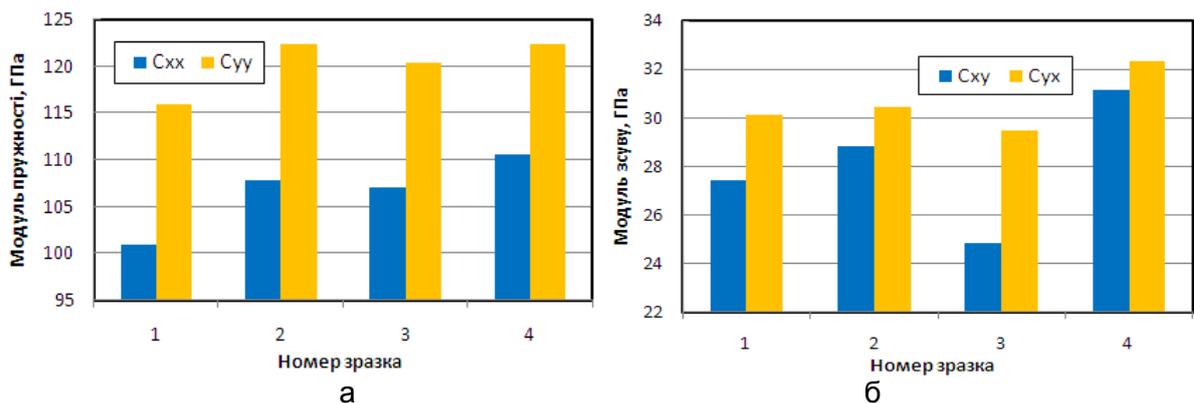


Рисунок 5 – Упругие постоянные для образцов, полученных с использованием разных технологических схем

Таким образом, акустические поля могут отображать особенности состава материала, его дефектность, влияние технологических режимов на свойства, структурную неоднородность по объёму, а также оценивать модули упругости, характеристики неупругости и анизотропию свойств материала.

## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВИБРАЦИЙ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КВАРЦЕВОМ ПЕСЧАНИКЕ**

**Кочанов А.Н.<sup>1</sup>, Кочанов С.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия, kochanov@mail.ru*

<sup>2</sup> *Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, Санкт-Петербург, Россия, kochanoff1242@yandex.ru*

Ультразвуковые методы, основанные на изучении распространения высокочастотных волн в материалах, получили широкое применение при решении задач, связанных с оценкой свойств и изменения состояния твердых тел, в том числе и горных пород. В качестве информативного параметра при проведении лабораторных исследований обычно используется скорость продольных волн, которая характеризует упругие свойства, является функцией минерального состава, зависит также от напряженно-деформированного состояния горных пород и степени их микротрещиноватости. Методика проведения определения этого параметра проста и хорошо отработана. Большинство горных пород представляют собой гетерогенные материалы, содержащие разнообразные породообразующие минералы и большое количество микродефектов. Специфика распространения упругих волн в горных породах как неоднородных средах заключается в том, что изменение кинематических и динамических характеристик волн связано не только с геометрией фронта и поглощением, но и с процессами рассеяния волн неоднородностями.

Для оценки структурной неоднородности образцов, связанной с наличием микродефектов и локальными внутренними напряжениями, а также для изучения эволюции микродефектов в результате высокочастотного ультразвукового воздействия проведены экспериментальные исследования, результаты которых частично отражены в работах [1–2]. Определение скорости продольных волн в образцах горных пород осуществлялось по схеме прозвучивания, когда датчики с собственной частотой 100 кГц располагались на противоположных гранях образца. Использовалась серийная ультразвуковая аппаратура УК-14П, а измерения осуществлялись по двум взаимно перпендикулярным направлениям с шагом 3 см. При проведении экспериментов использовались образцы песчаника размером 50(30)х 25(20)х15(12,5) см, которые находились при комнатной температуре в лаборатории и были изготовлены примерно год назад. Песчаник кварцевый, слюдистый, мелкозернистый, представляет собой конгломерат практически не трещиноватых зерен кварца. Процентное содержание кварца 99 %. Средний размер зерен равен 0,21–0,29 мм, размер пор 0,06–0,13 мм, пористость 7–9 %. Длительность ультразвукового контроля образцов песчаника в отдельных случаях составляла ~1,5 года. Практически все образцы песчаника были неоднородны и имели области, которые отличались разными значениями скорости, например, в центральной части и по краям образцов. Максимальное значение скорости продольных волн для песчаника составляло 5200 м/с. Наблюдалась анизотропия акустических свойств, которая оценивалась коэффициентом анизотропии  $K_a$  как отношение скоростей продольных волн по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Значения  $K_a$  для образцов песчаника составляли 1,2–1,3.

Результаты ультразвукового контроля образцов песчаника с течением длительного времени представлены в таблицах 1 и 2. Следует отметить, что экспериментальная ошибка при многократных измерениях скорости распространения продольных волн в одних и тех же точках образцов в течение суток не превышала 3–5 %.

Таблица 1 – Значения скорости распространения продольных волн в песчанике №1 (м/с) с течением времени от первоначального измерения

NN	Время наблюдений, сутки				
	0	38	245	365	404
1	2560	3280	3760	4270	4570
2	2210	3200	3710	4270	4270
3	2070	2910	3760	4270	4270
4	2070	3050	3760	4270	4270
5	2250	3280	4270	4270	4270
6	2330	3370	4410	4570	4570
7	2560	3460	4410	4570	4740
8	2840	3370	4270	4570	4740
9	3050	3560	4270	4570	4930
10	3280	3660	4270	4570	4930
11	3460	3710	4270	4570	4930
12	3560	3710	4270	4410	4570
13	3200	3710	4270	4570	4570
14	3050	3710	4270	4570	4570
15	3200	3710	4570	4570	4570
16	3200	4270	4570	4570	4570

Таблица 2 – Значения скорости распространения продольных волн в песчанике №2 (м/с) с течением времени от первоначального измерения

NN	Время наблюдений, сутки				
	0	36	37	47	113
1	2840	3130	3290	3290	3910
2	2980	3130	3290	3290	3680
3	2980	3130	3290	3290	3680
4	2840	3130	3130	3290	3470
5	2970	3130	3290	3290	3570
6	2970	3210	3210	3290	3470
7	2970	3130	3210	3290	3470
8	2970	3130	3210	3290	3470
9	2970	3290	3290	3290	3570
10	3290	3470	3570	3470	3680
11	3290	3470	3570	3680	3680
12	3290	3470	3680	3570	3680
13	3290	3470	3680	3910	4170

Для наглядности табличные данные для отдельных локальных точек измерений представлены в виде графиков (рис. 1 и 2).

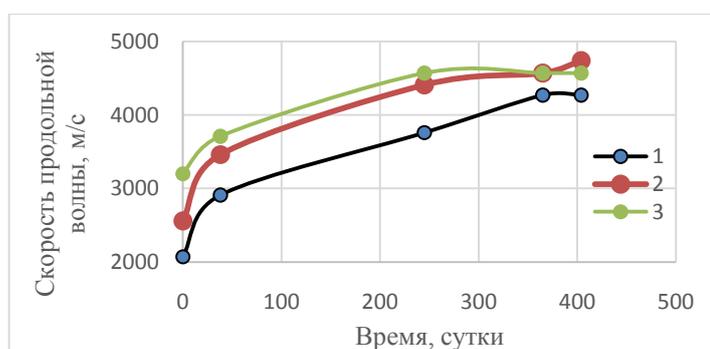


Рисунок 1 – Динамика роста скорости продольных волн для отдельных локальных точек образца №1 при ультразвуковом прозвучивании: 1 – т.ч. №3, 2 – т.ч. №7, 3 – т.ч. №15

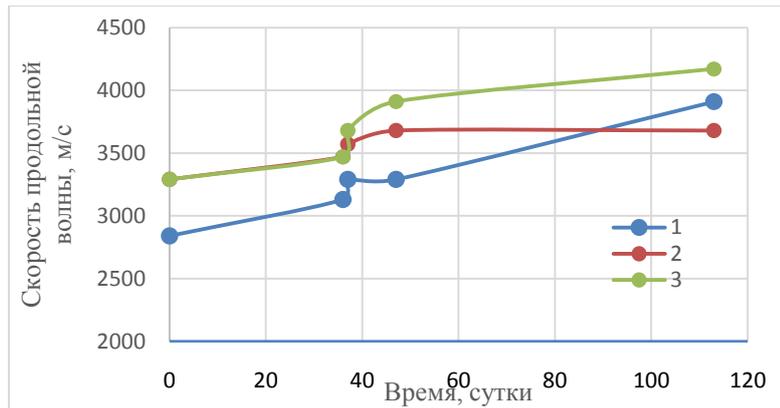


Рисунок 2 – Динамика роста скорости продольных волн для отдельных локальных точек образца №2 при ультразвуковом прозвучивании: 1 – т.ч №3, 2 – т.ч. №10, 3 – т.ч. №13

Как следует из графиков, под действием высокочастотных ультразвуковых колебаний наблюдается вначале скачкообразный, а затем более плавный рост скорости продольных волн. При этом увеличение скорости при длительном ультразвуковом контроле образцов в отдельных его точках могло достигать 50 %. Следует отметить также снижение значений коэффициента анизотропии  $K_a$  с течением времени до значений 1,1 по сравнению с исходным значением. Очевидно, что этот эффект может быть связан с реакцией среды на ультразвуковую обработку при проведении измерений в плане снижения дефектности структуры и снятия остаточных напряжений. Известно, что механические вибрации существенно влияют на физические свойства материалов и их прочность [3–5]. При длительном ультразвуковом воздействии в среде преобладают две тенденции: развитие микротрещин и пластических деформаций и одновременно благодаря релаксационным свойствам материала залечивание очагов микротрещин, сценарий которых зависит от амплитуды и мощности высокочастотных импульсов, а также от структурных свойств самого материала.

Результаты исследований могут быть использованы для развития представлений о процессах деформирования и разрушения горных пород и послужить основой для разработки новых экспериментальных методик исследования этих процессов с помощью акустических методов, а также должны быть приняты во внимание при проведении ультразвуковых измерений скоростей упругих волн в образцах горных пород и материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кочанов, А. Н. Ультразвуковой контроль и эволюция структурных изменений природных материалов// Международная научная конференция «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы» 26-29 сентября 2016 г. Витебск, Беларусь: материалы конференции / УО «ВГТУ». – Витебск, 2016. – С. 185–187.
2. Кочанов, А. Н. Релаксация скорости продольных волн при неразрушающем динамическом воздействии на горные породы/ Новые технологии в науке о Земле: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Нальчик: Каб.-Балк. Ун-т. – 2014. – С. 102–107.
3. Садовский, М. А. Избранные труды. – М.: Наука, 2004. – С. 395–399.
4. Dajun Zhao, Shulei Zhang, Meiyang Wang Microcrack Growth Properties of Granite under Ultrasonic High-Frequency//Excitation Advances in Civil Engineering 2019|Article ID3069029| <https://doi.org/10.1155/2019/3069029>.
5. Самигуллина, А. А., Царенко, Ю. В., Рубаник, В. В., Попов, В. А., Даниленко, В. Н., Мулюков, Р. Р. Письма о материалах. – 2012. – Т. 2. – С. 214–217.

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СПЛАВОВ

Кузьмар И.И., Гульпа Д.Ю., Кушнер Л.К.

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, РБ, kushner@bsuir.by

Повышение качества покрытий является одной из наиболее актуальных задач в области гальванотехники. Паяемые покрытия на основе олова во многом определяют надежность работы электронных приборов. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к их свойствам, являются сохранение способности к пайке после длительного хранения наряду с высокой коррозионной стойкостью и декоративным видом.

Установлены закономерности влияния ультразвуковых колебаний на механизм формирования, состав и структуру покрытий сплавами олово-висмут, олово-медь, медь-олово, олово-серебро и олово-медь-серебро [1–3].

Исследование кинетических закономерностей процесса формирования сплавов показало, что электроосаждение в ультразвуковом поле приводит к деполяризации катодного процесса и увеличению предельного тока (рис. 1), что обусловлено интенсификацией массопереноса на границе электрод-электролит, увеличением количества активных центров на поверхности электрода, уменьшением градиента концентрации молекул и ионов водорода вблизи поверхности катода. С ростом интенсивности ультразвука наблюдается снижение катодной поляризации, увеличение диффузионного предельного тока и выхода по току, особенно при высоких плотностях тока (рис. 2), что позволяет интенсифицировать процесс электролиза.

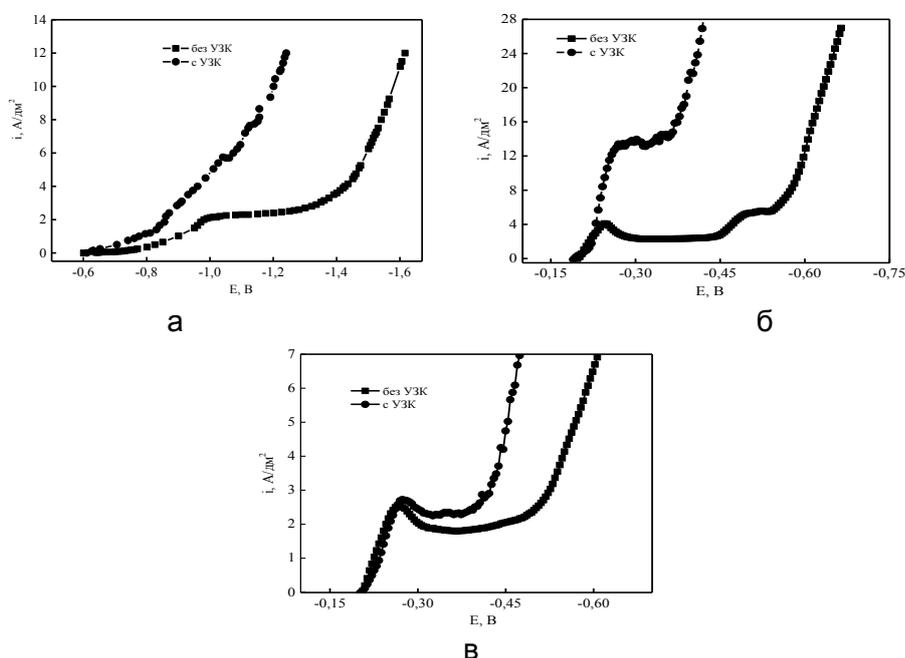


Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики процессов электроосаждения сплавов  $Sn-Bi$  (а),  $Sn-Ag$  (б) и  $Sn-Cu-Ag$  (в) без (1) и при воздействии ультразвука интенсивностью  $0,75 Вт/см^2$  (2)

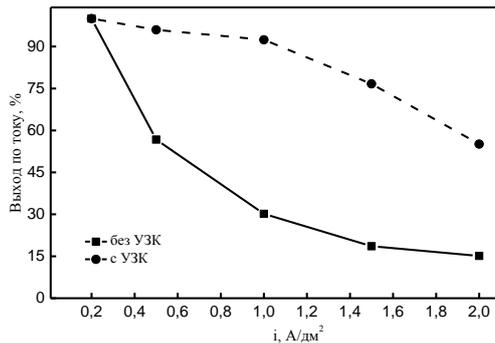


Рисунок 2 – Влияние ультразвука на выход по току сплава Sn-Bi при электроосаждении без ультразвука (1) и с ультразвуком интенсивностью 0,75 Вт/см<sup>2</sup> (2)

Установлено, что при соноэлектрохимическом осаждении увеличивается содержание более электроположительного компонента (Bi, Ag, Cu), что обусловлено снижением катодной поляризации процесса (рис. 3).

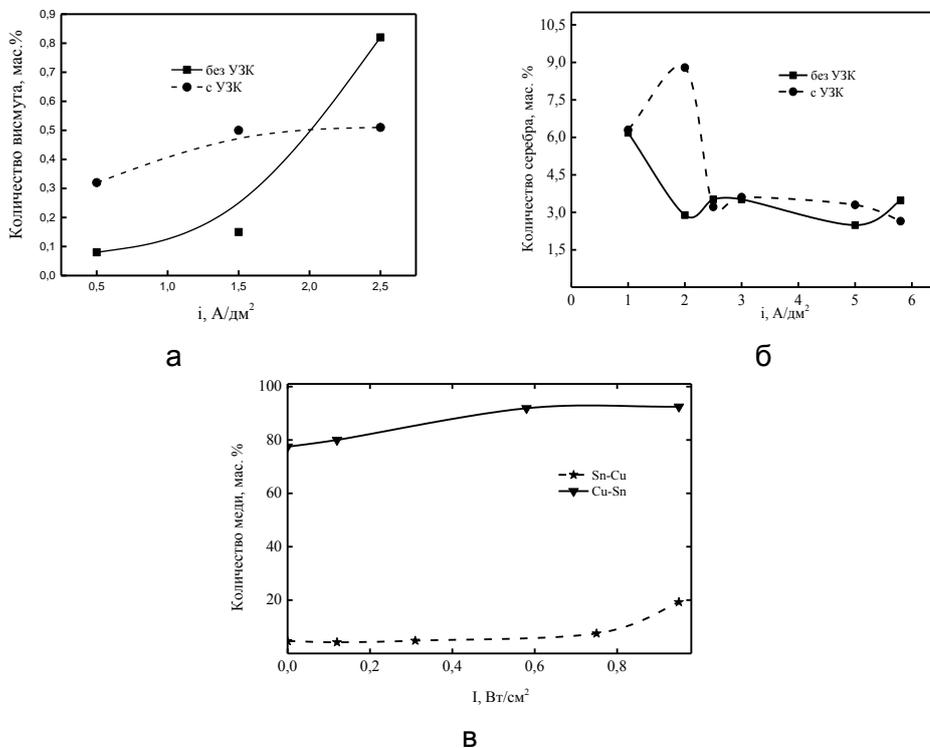
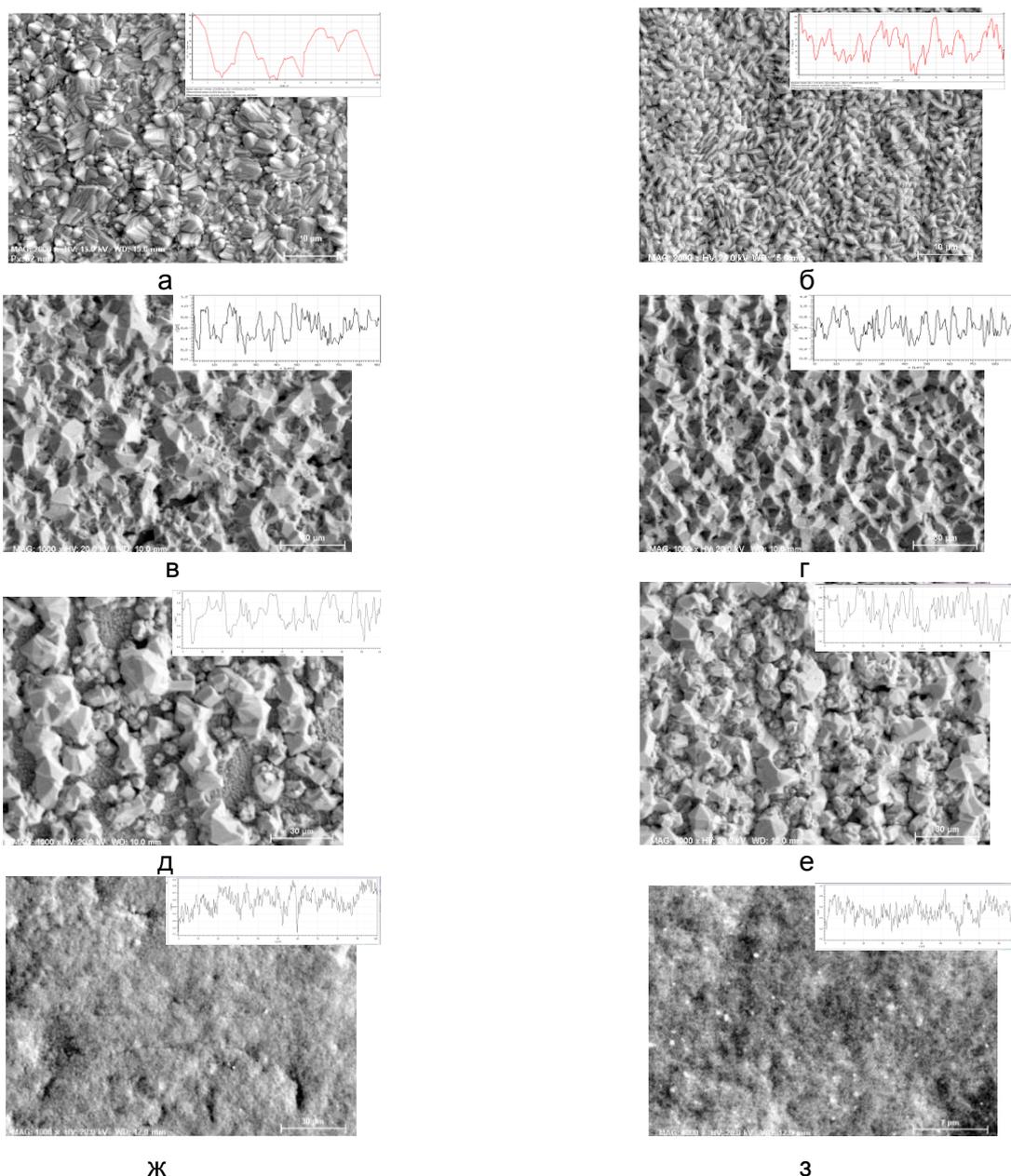


Рисунок 3 – Влияние ультразвука на содержание легирующего компонента в покрытиях сплавами Sn-Bi (а) и Sn-Ag (б), Sn-Cu и Cu-Sn (в)

Существенное влияние оказывает ультразвук на структуру сплавов. При осаждении без ультразвука рельеф поверхности осадков неравномерный, зерна имеют четко выраженные границы (рис.к 4). Ультразвук позволяет увеличить верхний предел рабочих плотностей тока и формировать плотные, равномерные, мелкокристаллические покрытия, поверхность становится сглаженной и однородной по размеру зерна. Так ухудшение качества покрытий сплава Sn-Ag наблюдается уже при плотности тока 4,0 А/дм<sup>2</sup>, а соноэлектрохимическое осаждение расширяет предел до 12,0 А/дм<sup>2</sup>.

Таким образом, электрохимическое осаждение покрытий сплавами при интенсифицирующем воздействии ультразвука позволяет управлять процессом разряда отдельных компонентов, влияет на кинетику, соотношение металлов в сплаве, на структуру и, как следствие, на свойства покрытий [1–3], обеспечивает повышение надежности паяных соединений.



Ж з  
Рисунок 4 – СЭМ-изображения поверхности покрытий сплавами *Sn-Bi* (а, б), *Sn-Cu* (в, г) и *Sn-Cu-Ag* (д, е), *Cu Sn* (ж, з), полученных без (а, в, д, ж) и при воздействии ультразвука с интенсивностью  $0,75 \text{ Вт/см}^2$  (б, г, е, з)

Таким образом, соноэлектрохимическое осаждение сплавов позволяет управлять составом и структурой, а, следовательно, и свойствами покрытий, интенсифицировать процесс электролиза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние ультразвуковых колебаний на кинетику процесса электроосаждения и структуру сплавом олово-висмут / В. К. Василец, И. И. Кузьмар, А. А. Хмыль, Н. В. Дежунюв, Д. Л. Горбачев // Доклады БГУИР. – № 5(91). – 2015. – С.12–18.

2. Гульпа, Д. Ю. Влияние условий электролиза на скорость осаждения и элементный состав покрытий сплавом олово-медь / Д. Ю. Гульпа, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, А. В. Левко, А. А. Хмыль // Материалы докладов Межд. научно-технической конференции молодых ученых «Инновационные материалы и технологии». – БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь, 9–10 янв. 2020. – С. 261–264.

3. Кушнер, Л. К. Электролиз сплава медь-олово импульсным током / Л. К. Кушнер, А. А. Касач, И. И. Курило, И. И. Кузьмар, А. А. Хмыль // Материалы докладов Междун. научно-техн. конференции «Современные электрохимические технологии и оборудование». – БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь, 2019. – С. 108–112.

## **ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПОРШНЕВОГО ТИПА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ**

**Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Тertiшников П.П., Боченков А.С.**  
*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, РФ*

Аннотация: в статье рассмотрены вопросы и особенности проектирования, а в дальнейшем и создания новейшего, не имеющих аналогов, излучателя поршнеобразного вида, предназначенного для создания высокоинтенсивных акустических полей ультразвуковой частоты в различных газовых средах. Прототипом для проектирования и создания предложенного излучателя является цилиндрическое тело длиной, равной половине длины волны формируемых преобразователем ультразвуковых колебаний в материале излучателя. Далее цилиндрическое тело соединилось с электроакустическим преобразователем. Из-за того, что присоединительная плоскость, предназначенная для возбуждения колебаний с ультразвуковой частотой, выполняется углубленной, относительно торцевой поверхности, удаётся значительно увеличить амплитуду механических колебаний излучающей поверхности. Предложенная и разработанная конструкция излучателя ультразвуковой частоты для воздействия на газовые среды позволяет создавать в озвучиваемой среде интенсивность не менее 155 дБ при потребляемой мощности не более 90 Вт.

Ключевые слова: ультразвук, газовая среда, ультразвуковой излучатель.

Воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности позволяет реализовать новые процессы, существенно ускорить известные технологии и получать новые вещества с уникальными свойствами [1]. В частности, известно, что воздействие ультразвуковыми колебаниями через нерезонансные газовые промежутки позволяет повысить эффективность газоочистительного оборудования, реализовать сушку без существенного нагрева высушиваемого материала с большей скоростью, по сравнению с сушкой без ультразвукового воздействия, эффективно разрушать пену без применения химических реагентов. В настоящее время для интенсификации процессов в газовых средах применяются продольно колеблющиеся резонансные пьезоэлектрические колебательные системы [2]. Однако они не способны создавать в газовых средах ультразвуковые колебания с уровнем звукового давления 130...150 дБ.

Однако, несмотря на высокую эффективность и потребность, ультразвуковое интенсифицирующее воздействие в газовых средах пока не находит широкого практического распространения. Это обусловлено тем, что имеющиеся источники ультразвукового воздействия (газоструйные излучатели, динамические сирены, электроакустические преобразователи пьезоэлектрического типа) не обеспечивают требуемый уровень звукового давления, частоту и направленность излучения [3]. Созданные в последние годы ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) на основе пьезоэлектрического преобразователя, с излучателями в виде изгибно-колеблющихся дисков не получают широкого распространения из-за их высокой стоимости, сложности изготовления, малой эффективности излучения, высокой вероятности разрушения и невозможности изготовления таких излучателей диаметром более 300...400 мм.

Отсутствие пригодных и эффективных излучателей и высокая потребность в практической реализации технологических процессов в газовых средах обуславливают необходимость создания высокоэффективных ультразвуковых излучателей для газовых сред.

Поскольку при излучении в газовые среды воздействие на излучатель со стороны обрабатываемой среды минимально, необходимо использование излучателей с максимально возможными резонансными свойствами.

Основой конструкции такого излучателя может служить цилиндрическое тело резонансной (полуволновой) длины, соединенное с электроакустическим преобразователем. Эскиз предложенного излучателя представлен на рисунке 1.

Отличительной особенностью предложенного излучателя, позволяющей увеличить амплитуду его резонансных колебаний, является выполнение присоединительной для возбуждения колебаний плоскости (поз.3), углубленной относительно торцевой поверхности (поз.1) на расстояние (H). При этом, торец концентратора ультразвуковой колебательной системы присоединяется к плоскости отверстия (поз.3).

При такой конструктивной схеме излучателя коэффициент трансформации определяется как отношение амплитуды колебаний излучающей поверхности (поз.1) к амплитуде колебаний присоединительной плоскости (поз.3):

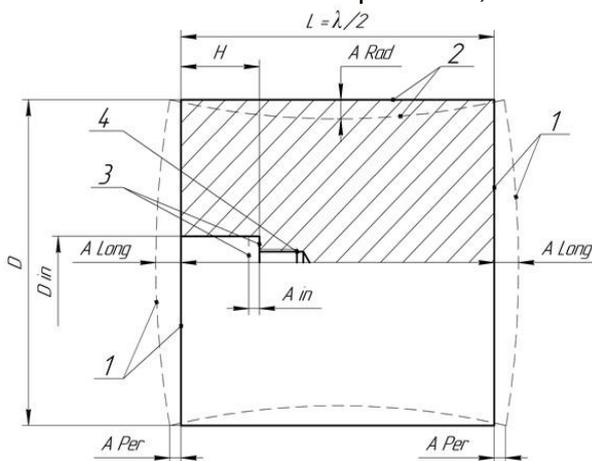
$$K_{Tr} = \frac{A_{Long}}{A_{in}}. \quad (1)$$

Исследование предложенного излучателя и оптимизация его параметров проведены с помощью метода конечных элементов.

На рисунке 1 б (кривая 1) представлена расчетная зависимость коэффициента трансформации от относительной глубины отверстия (H/L, поз.3, рис. 1 а). На кривой 2 рисунка 1 б представлена зависимость частоты собственных колебаний от отношения (H/L).

Расчеты были проведены при диаметре излучателя  $D = 0,1$  м;  $D_{in} = 0.015$  м;  $L = 0.1$  м. В качестве материала излучателя использован алюминиевый сплав В95 ( $E = 7,1 \cdot 10^{10}$  Па;  $\rho = 2800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,31$ ).

Как следует из представленных зависимостей (рисунок 1 б, кривая 1), при соотношении  $H/L=0,4$  коэффициент трансформации стремится к бесконечности. Вызвано это тем, что при данном соотношении присоединительная плоскость находится в зоне минимальных продольных колебаний. При этом частота колебаний (рис. 1 б, кривая 2) достигает своего максимального значения при  $H/L=0,15$ , а минимального значения при  $H/L=0,75$ .



- 1 – торцевая излучающая поверхность;
  - 2 – цилиндрическая излучающая поверхность;
  - 3 – присоединительная плоскость;
  - 4 – резьбовое отверстие; D – диаметр цилиндра; D<sub>in</sub> – диаметр присоединительного отверстия; L – длина цилиндра; A<sub>Rad</sub> – амплитуда радиальных колебаний; A<sub>Long</sub> – амплитуда продольных колебаний; A<sub>in</sub> – амплитуда колебаний на входе; A<sub>Per</sub> – амплитуда колебаний ребра излучателя; H – глубина отверстия с присоединительной плоскостью
- Рисунок 1 а – Эскиз излучателя

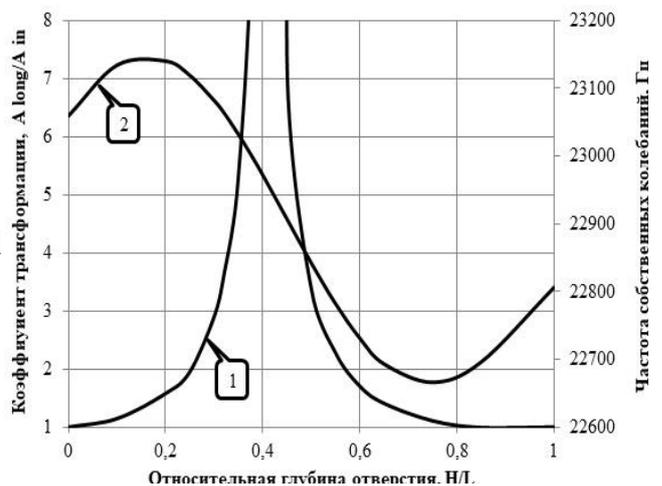
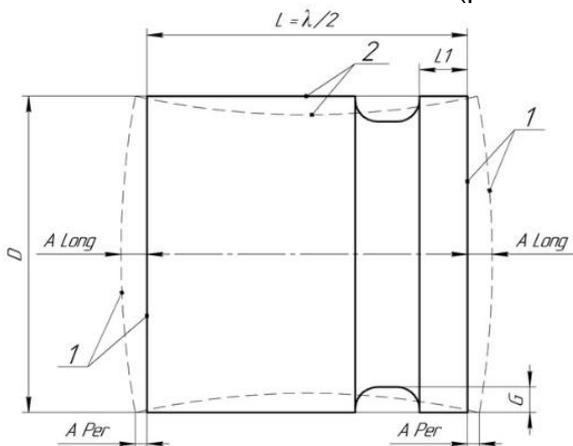


Рисунок 1 б – Зависимость коэффициента трансформации (кривая 1) и частоты собственных колебаний (кривая 2) от отношения (H/L)

Для обеспечения равномерности амплитуд колебаний торцевой поверхности было предложено выполнить проточку на цилиндрической части излучателя (рис. 2 а). На рисунке 2 б (кривая 1) приведена зависимость стандартного отклонения относительных амплитуд колебаний от относительной глубины канавки и зависимость частоты собственных колебаний (рис. 2 б, график 2).



1 – торцевые излучающие поверхности;  
2 – цилиндрическая излучающая поверхность;

D – диаметр цилиндра; L – длина цилиндра;  
A Rad – амплитуда радиальных колебаний;  
Along – амплитуда продольных колебаний;  
A Per – амплитуда колебаний ребра цилиндра; L1 – расстояние от излучающей торцевой плоскости до проточки;  
G – глубина проточки

Рисунок 2 а – Эскиз излучателя поршневого типа с проточкой

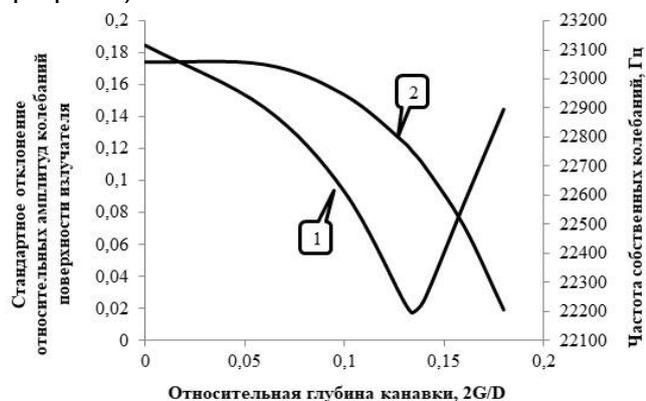
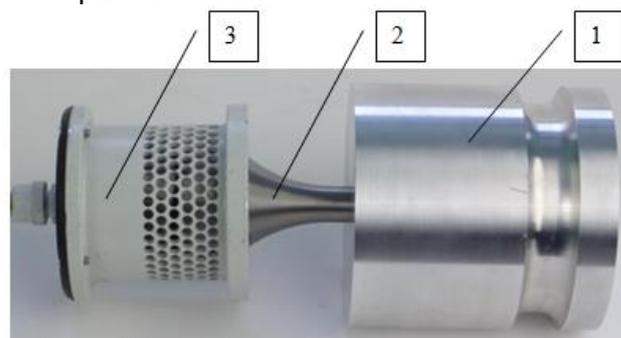


Рисунок 2 б – Зависимость стандартного отклонения относительных амплитуд колебаний (график 1) и частоты собственных колебаний (график 2) от относительной глубины канавки ( $2G/D$ )

Анализ полученных результатов позволил определить оптимальную глубину ( $G = 0,13D$ ) кольцевой проточки, при которой обеспечивается максимальная равномерность распределения колебаний поверхности излучателя.

На рисунке 3 приведено фото изготовленной ультразвуковой колебательной системы с излучателем поршневого типа.



1 – ультразвуковой излучатель; 2 – пьезопреобразователь; 3 – корпус  
Рисунок 3 – Фото разработанной ультразвуковой колебательной системы

Измерения уровня звукового давления изготовленной практической конструкции показали, что УЗ излучатель обеспечивает уровень звукового давления не менее 155 дБ на расстоянии 1 м. При этом в фокусе излучатель обеспечивает уровень звукового давления не менее 162 дБ при потребляемой мощности не более 90 Вт.

В результате проведенных исследований был создан ультразвуковой излучатель поршневого типа, способный обеспечить воздействия на газовые среды с интенсивностью не менее 155 дБ при потребляемой мощности не более 90 Вт.

**Исследование проводилось при финансовой поддержке гранта президента МК-1487.2020.8 и РФФИ и Министерства образования и науки Алтайского края в рамках научного проекта №19-48-220001.**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розенберг, Л. Д. Источники мощного ультразвука. – М.: Наука, 1967. – 265 с.
2. Хмелев, В. Н., Цыганок, С. Н., Шалунов, А. В., Лебедев, А. Н., Хмелев, С. С., Галахов, А. Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 1. – С. 148–157.
3. Gallego-Juarez, J. A., Riera-Franco de Sarabia, E., Rodrigues-Corral, G., Hoffman, T. L., Galvez-Moraleda, G. C., Rodriguez-Maroto, J. J., Gomez-Moreno, F. J., Bahillo-Ruiz, A., Martin-Espigares, M., Acha, M. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants // Environmental science and technology. – 1999. – V. 33, No. 21. – P. 3843–3849.

## ПУТИ РАЗВИТИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ

Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А.

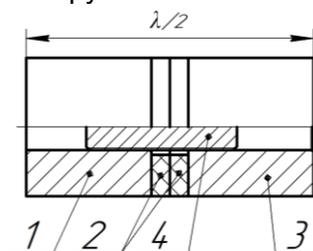
Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, РФ

Аннотация: в статье рассмотрены перспективные методы увеличения мощности и частоты ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей для реализации новых технологических процессов, не реализуемых до настоящего времени. Предложена новая конструктивная схема высокочастотного пьезоэлектрического преобразователя увеличенной мощности, предназначенного для излучения в жидкие и газовые среды ультразвуковых колебаний в диапазоне 30...100 кГц. В ее основу положен принцип суммирования на диаметрально колеблющейся суммирующей накладке колебаний радиально установленных преобразователей Ланжевена. Проектирование и разработка практических конструкций позволили установить оптимальные конструктивные размеры преобразователей, разработать методику их конструирования, изготовить и исследовать их частотные и мощностные функциональные возможности.

Ключевые слова: ультразвук, ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь, пьезокольцо.

Осуществимость и эффективность всех технологий, основанных на применении ультразвука, определяется частотой и энергией воздействия. Поэтому практическая реализация известных процессов и создание новых технологий с максимальной эффективностью требуют создания и применения излучателей ультразвуковых колебаний широкого диапазона частот и с максимально возможной мощностью. Известно, что воздействие ультразвуковыми колебаниями с частотами от 15 до 30 кГц позволяет ускорять процессы эмульгирования, диспергирования, дегазации жидкостей, стерилизации, гомогенизации, а на высоких частотах (более 30 кГц) – разделять эмульсии и осветлять сточные воды, очищать буровые растворы от инородных частиц, отделять нефть от воды [1], агломерировать тонкодисперсные аэрозольные частицы в газовых средах [2], напылять однородные покрытия [3].

Возможность преобразования определенного количества электрической энергии (мощность преобразователя) в энергию УЗ колебаний определяется диаметром и толщиной пьезоэлементов (т.е. объемом используемого в конструкции преобразователя пьезоматериала) и не превышает для современных материалов 20 Вт на 1 см<sup>3</sup> [4]. Для преобразования электрической энергии в энергию ультразвуковых колебаний с максимальной эффективностью используются преобразователи, выполненные по конструктивной схеме Ланжевена (рис. 1).



1 – излучающая частотопонижающая накладка; 2 – пьезокерамические элементы;  
3 – отражающая частотопонижающая накладка; 4 – шпилька

Рисунок 1 – Схема ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя Ланжевена

Преобразователи конструктивно состоят из последовательно установленных, механически и акустически связанных между собой излучающей накладки, двух или четырех пьезоэлектрических кольцевых элементов и отражающей накладки. Длина всей конструкции соответствует половине длины волны в материалах преобразователя и определяет резонансную частоту формируемых ультразвуковых

колебаний. По такой конструктивной схеме выполняются современные излучатели на рабочие частоты от 15 до 30 кГц. Для дальнейшего увеличения мощности преобразователей применяется последовательное соединение нескольких преобразователей Ланжевена (рис. 2).

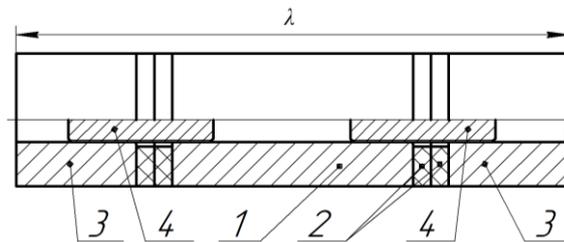
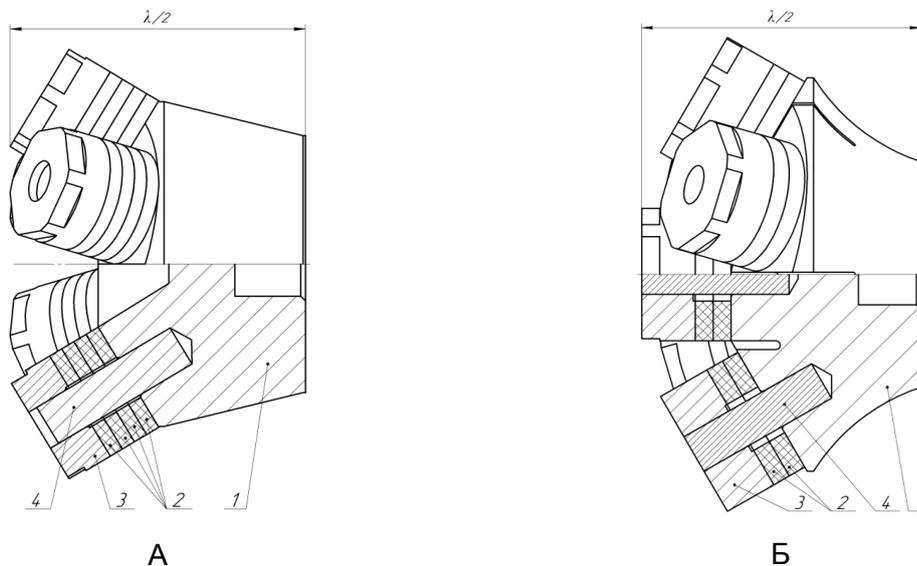


Рисунок 2 – Схема ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя

С помощью такого подхода можно увеличить мощности преобразователя не более чем в 2–4 раза (зависит от частоты и толщины и количества пьезокерамических элементов). В основном, ограничение связано с прочностью стягивающей шпильки, находящейся в зоне максимальных напряжений. При таком размещении существенно увеличивается общая длина ультразвуковой колебательной системы.

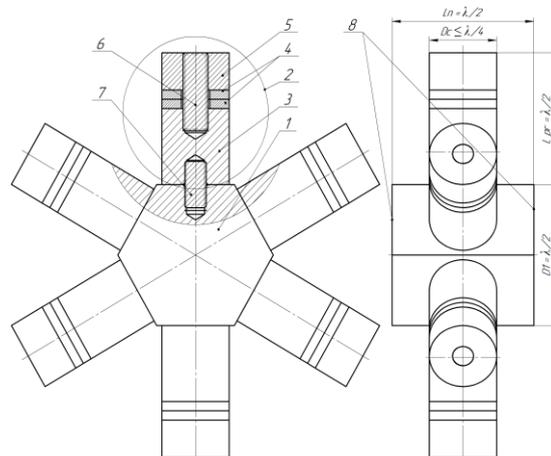
Более перспективным подходом увеличения мощности является суммирование мощности отдельных пьезопреобразователей на общей суммирующей накладке (рис. 3).



1 – излучающая частотопонижающая накладка; 2 – пьезоэлектрические элементы;  
 3 – отражающая частотопонижающая накладка; 4 – шпилька;  
 А – пьезоэлектрический преобразователь с пьезоэлементами с диаметром 50 мм;  
 Б – пьезоэлектрический преобразователь с пьезоэлементами 60 мм  
 Рисунок 3 – Схема ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя

С помощью предложенной схемы можно увеличить мощность преобразователя в 3–7 раз (при постоянной частоте). Ограничение по мощности связано с максимальным количеством размещаемых пьезоэлектрических элементов. Из представленных схем можно видеть, что увеличение диаметра излучающей суммирующей накладки приводит к усложнению конструкции. Увеличение диаметра пьезоэлементов приводит к увеличению диаметра суммирующей излучающей накладки, что в свою очередь приводит к появлению изгибных колебаний и вследствие этого неравномерности колебаний отдельных пьезопакетов. Для повышения равномерности колебаний вводятся дополнительные элементы конструкции (прорези), что приводит к появлению зон с высокими механическими напряжениями, и соответственно к поломкам преобразователей. Также данная схема не позволяет последовательно присоединять преобразователи последовательно друг к другу (как на

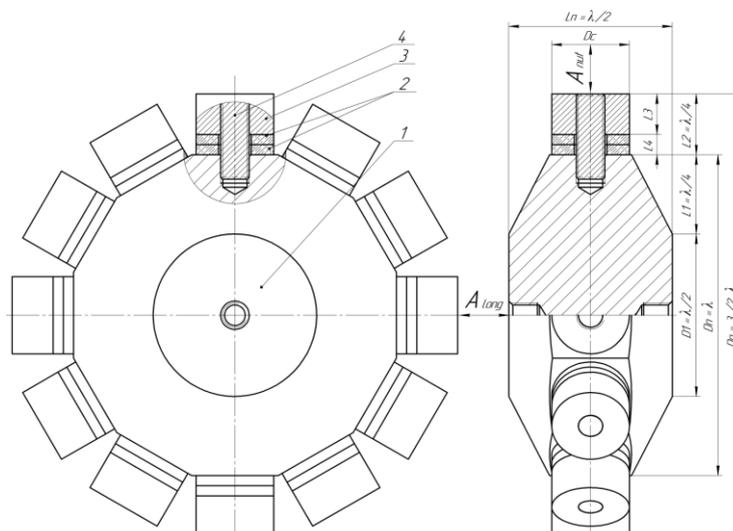
рис. 2), что также накладывает мощностные ограничения на данную схему суммирования. К сожалению, такая конструктивная схема имеет существенные ограничения по частотным характеристикам из-за возникновения диаметральных колебаний суммирующей накладки. Поэтому, дальнейшим путем развития стала разработка новой конструктивной схемы суммирования (рис. 4), которая объединяет преимущества классических преобразователей Ланжевена и схемы, представленной на рисунке 3.



1 – суммирующая накладка; 2 – пьезопреобразователь Ланжевена; 3 – изучающая накладка;  
4 – пьезокерамические кольца; 5 – отражающая накладка; 6, 7 – шпильки;  
8 – излучающие поверхности

Рисунок 4 – Конструктивная схема ультразвукового преобразователя увеличенной мощности

Для увеличения мощности пьезоэлектрических преобразователей предложено использовать диаметральные колебания (считающиеся паразитными в преобразователях Ланжевена) общей суммирующей накладки. Для этого высокочастотные колебания, создаваемые радиально установленными преобразователями Ланжевена, суммируются на накладке, выполненной в виде цилиндра, диаметр и высота которого соответствуют половине длины волны ультразвуковых колебаний в материале накладки. В такой конструктивной схеме изучающая накладка выполняет одновременно функции сумматора и преобразователя диаметральных колебаний в продольные колебания. Практическая конструкция, в которой суммирующая накладка, изучающая накладка и шпильки объединены в единую деталь, представлена на рисунке 5.



1 – суммирующая изучающая накладка; 2 – пьезокерамические элементы;  
3 – отражающие накладки; 4 – соединительные шпильки

Рисунок 5 – Практическая конструкция пьезопреобразователя увеличенной мощности

Также одним из основных преимуществ предложенной конструктивной схемы (вследствие наличия двух присоединительных поверхностей) является возможность последовательного присоединения нескольких преобразователей. Таким образом, выявленные принципиальные ограничения на создание высокочастотных (30...100 кГц) излучателей увеличенной мощности позволили предложить и разработать новую конструктивную схему суммирования мощностей отдельных преобразователей Ланжевена на диаметрально колеблющейся суммирующей накладке. Созданные по новой конструктивной схеме УЗ излучатели обеспечили обработку технологических сред на повышенной частоте (до 100 кГц) с увеличенной не менее чем в 7 раз мощностью.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 19-19-00121.**

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Y. M. Kuzovnikov, S. S. Khmelev, S. N. Tsyganok and V. N. Khmelev, Studying of coagulation and sedimentation of small hard particles in liquid medium during ultrasonic treatment, 2010 11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk, 2010, pp. 281-284. <https://doi.org/10.1109/EDM.2010.5568805>.
2. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. S. Dorovskikh, V. A. Nesterov, R. N. Golykh and I. S. Kozhevnikov, Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems, 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2017, pp. 294-297. <https://doi.org/10.1109/EDM.2017.7981759>.
3. V. N. Khmelev, A. N. Galakhov, A. V. Shalunov, V. A. Nesterov, R. N. Golykh and A. V. Shalunova, Study of the process of liquid atomization from the ultrasonic disk radiator, 2013 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Novosibirsk, 2013, pp. 119-122. <https://doi.org/10.1109/EDM.2013.6641956>.
4. APC International Ltd. Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications (APC International Ltd., 2002).

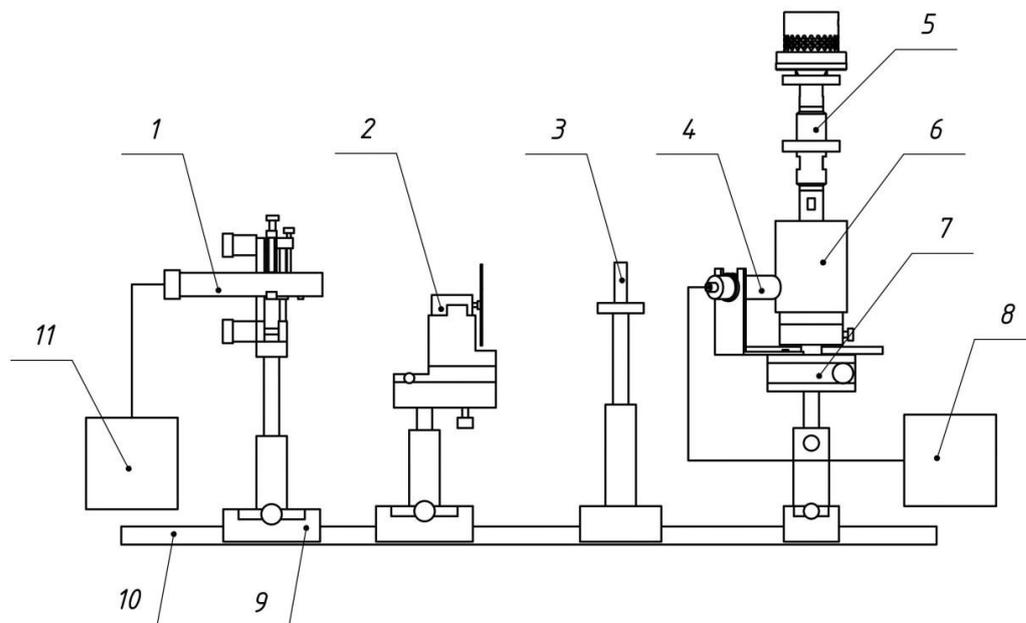
## РАССЕЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА НА ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ

Гриб А.Ф., Гаврилук В.С., Минчук В.С., Дежунов Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь, dnv@bsuir.by

Кавитация представляет собой явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости под действием переменного давления [1]. Эффективность преобразования и концентрации энергии ультразвука кавитационными пузырьками зависит от множества факторов, среди которых размер пузырьков – один из ключевых. Поэтому исследование распределения пузырьков по размерам в кавитационной области представляет значительный интерес.

В данной работе представлены результаты испытаний лазерной установки для исследования кавитации, включая анализ размеров пузырьков. Схема установки представлена на рисунке 1.

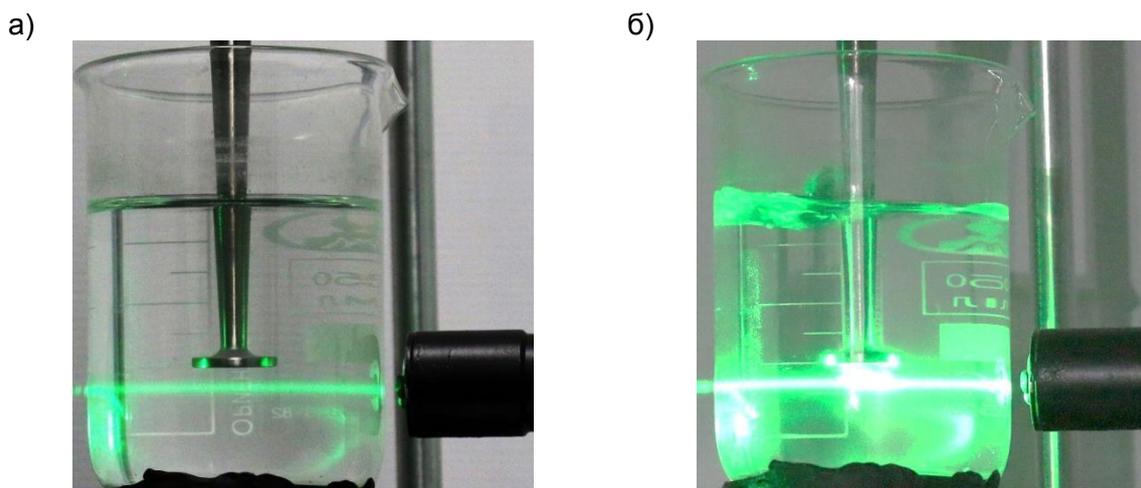


1 – лазер; 2 – модулятор; 3 – диафрагма; 4 – фотодиод; 5 – излучатель УЗ колебаний;  
6 – цилиндрическая кювета с жидкостью; 7 – поворотный столик; 8 – осциллограф; 9 – рейтер,  
10 – оптический рельс

Рисунок 1 – Схема установки для исследования распределения пузырьков по размерам

Принцип работы установки состоит в следующем. Луч полупроводникового лазера (длина волны 405 нм, 532 нм или 650 нм), пройдя через телескоп (для расширения пучка) и диафрагму, попадает в цилиндрическую кювету с исследуемой жидкостью. На выходе из кюветы рассеянное излучение попадает в фотоприемник, сигнал с которого регистрируется с помощью цифрового осциллографа. Для отстройки от фоновых засветок используется импульсное модулирование свечения лазера.

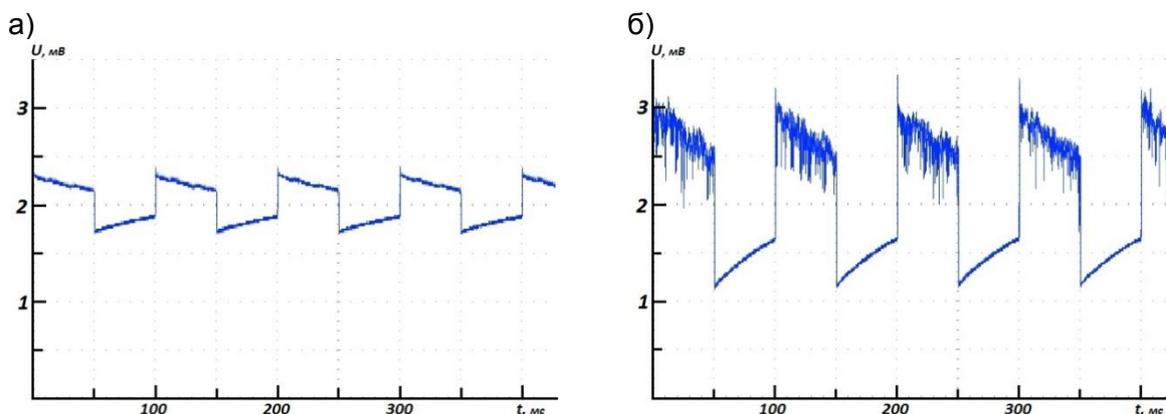
На рисунке 2 представлен общий вид кюветы с погруженным излучателем и включенным лазером: 2 а – без ультразвука (при отключенном генераторе), 2 б – с ультразвуком (фото справа).



Слева – без ультразвука, справа – при включенном излучателе, частота 22 кГц, мощность 75 Ватт

Рисунок 2 – Общий вид рассеяния лазерного света в кювете с дистиллированной водой

На рисунке 3 приведены результаты регистрации выходного сигнала фотодиода, принимающего рассеянное излучение при работе лазера в импульсном режиме без ультразвука (а) и с ультразвуком (б). Частота следования импульсов лазерного излучения 10 Гц, оптическая ось фотоприемника образует угол  $160^\circ$  с направлением луча.

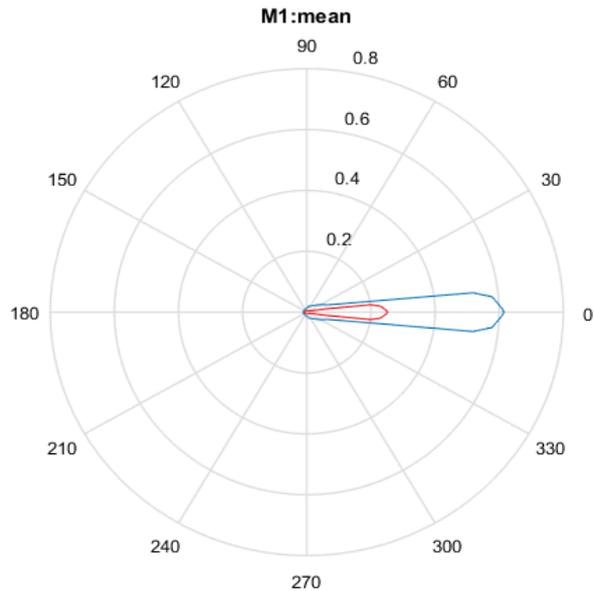


а) без ультразвука, б) при включенном излучателе, частота 22 кГц, мощность 75 Ватт

Рисунок 3 – Осциллограмма импульсов рассеянного лазерного излучения

Рассеяние, наблюдающееся при отсутствии ультразвука (рис. 3 а), обусловлено наличием в жидкости зародышей кавитации, которыми в соответствии с [1] могут служить стабилизированные микропузырьки воздуха или микрочастицы пыли. Возникновение кавитации на пути луча света вызывает кардинальное изменение интенсивности и характера регистрируемых импульсов (рис. 3 б). Большой разброс интенсивности рассеянного на кавитационных пузырьках света указывает на соответствующие вариации плотности пузырьков в кавитационной области.

На рисунке 4 приведены индикатриссы рассеяния лазерного света с ультразвуком и без ультразвука. Для построения индикатрисс фотоприемник перемещали вокруг оси кюветы и через каждые  $10^\circ$  регистрировали выходной сигнал фотоумножителя. Горизонтальная линия на рисунке 4 соответствует оси луча; направление  $180^\circ - 0^\circ$  – направление распространения света.



Внутренняя зависимость – рассеяние в жидкости без кавитации, внешняя – в кавитационной области

Рисунок 4 – Индикатрисса рассеяния лазерного излучения

Интенсивность рассеянного кавитационной областью света увеличивается при увеличении угла рассеяния от  $270^\circ$  до  $360^\circ$ , т.е. рассеяние происходит в основном в направлении «вперед» по отношению к направлению распространения зондирующего луча. Согласно теории рассеяния света [2] такой тип рассеяния наблюдается, если размер рассеивателей (в данном случае – кавитационных полостей) не больше длины волны рассеиваемого света. Отметим, что речь здесь идет о среднем размере за время жизни пузырька. Развернутый анализ индикатрисс рассеяния позволит оценивать распределение пузырьков по размерам.

***В докладе представлены результаты, полученные в ходе выполнения задания «Разработать и изготовить ультразвуковой кавитационный комплекс (УЗКК)» ГНТП «Эталон и научные приборы».***

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация. – Москва: Наука, 2008.
2. Борен, К., Хафмен, Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – Москва: Мир, 1986.

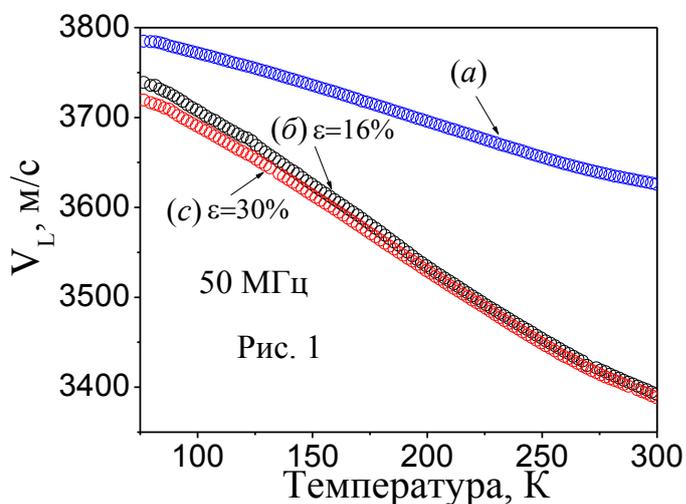
## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННОГО ВЫСОКОЧИСТОГО ГАФНИЯ

Булатов А.С., Ключко В.С., Корниец А.В., Соколенко В.И., Спицына В.И., Хаймович П.А., Шульгин Н.А., Кожевников О.Е., Пилипенко Н.Н., Малыхин Д.Г.  
 Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, г. Харьков, Украина, E-mail: korniets@kipt.kharkov.ua

Исследовался высокочистый гафний, пластически деформированный на  $\epsilon=16$  и 30 % техникой барокриодеформации (БКД), когда пластическая деформация материала осуществлялась экструзией в условиях всестороннего сжатия при  $T=77$  К [1]. По данным рентгенографии экструдированные образцы обладали аксиальной текстурой  $(10\bar{1}0)$  с кристаллографическим направлением  $[0001]$  нормально оси цилиндрических образцов. Как исходный материал использовался рафинированный гафний чистотой 99,87 мас.% основного элемента с резистивным отношением  $R_{300\text{ К}}/R_{4,2\text{ К}}\sim 40$  и размером зерна 1–3 мкм.

Измерение скорости  $V_L$  и изменения поглощения  $\Delta\alpha_L$  продольного ультразвука выполнялось методом ультразвуковой спектроскопии при частотах 20, 50 и 150 МГц в температурном интервале 77–300 К с целью проявить возможные термоактивированные релаксационные процессы в деформированном материале и выяснить физические механизмы, ответственные за них. Возбуждение и детектирование ультразвука осуществлялось при помощи широкополосных пьезопреобразователей из ниобата лития с собственной резонансной частотой 20 и  $50\pm 2$  МГц. Измерение выполнялось в импульсном режиме при амплитуде звуковой деформации  $\epsilon_0\sim 10^{-7}$ .

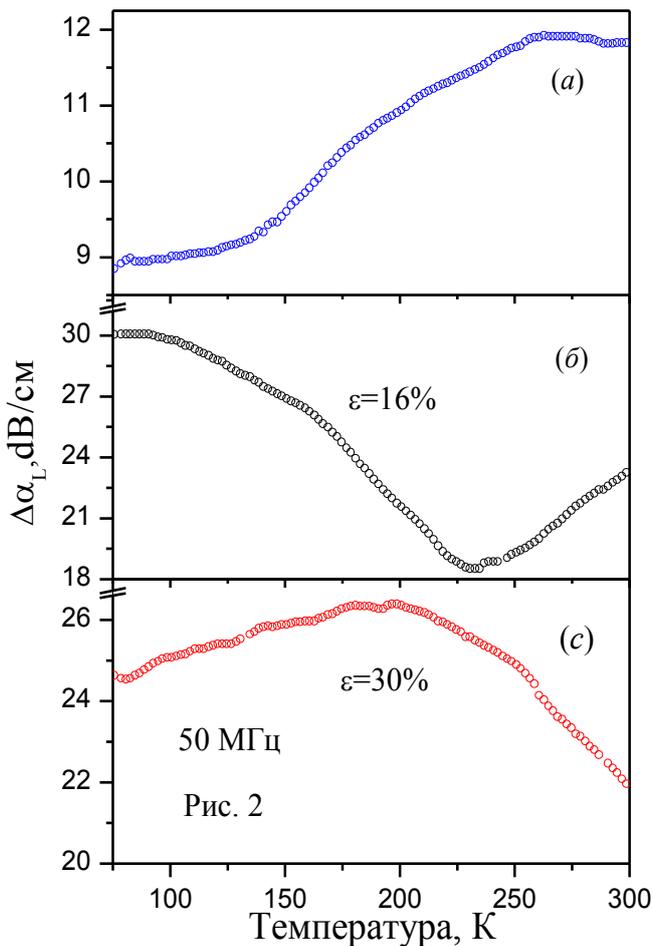
В результате исследований у экструдированных образцов обнаружено заметное ( $\sim 6\%$  при 300 К) уменьшение величины скорости ультразвука по сравнению с исходным состоянием, что непосредственно



отражает поведение продольного модуля упругости. При этом общий вид кривых  $V_L(T)$  исходного (рис. 1 а) и экструдированных образцов (рис. 1 б, с) практически идентичный, тогда как зависимости  $\Delta\alpha_L(T)$  (рис. 2 б, с) для экструдатов радикально отличаются от исходного состояния, для которого характерен типичный S-образный вид в соответствии с механизмом Ахиезера [2].

Кривые  $\Delta\alpha(T)$  деформированных образцов демонстрируют протяженную эстремальную зависимость с различной температурой локализации максимумов, отражая анизотропное состояние экструдатов, вызванное пластической деформацией  $N_f$ . На первом этапе БКД (всестороннее низкотемпературное сжатие) создается однородная  $\sim 10^{11}\text{--}10^{12}\text{ см}^{-2}$  плотность дислокаций, а в процессе экструзии возникает анизотропность текстурообразования с выделением плоскостей скольжения, в которых происходит движение дислокаций. При  $\epsilon=16$  и 30 % в разной степени преобладает кристаллическая текстура с призматическими  $\{10\bar{1}0\}$  и пирамидальными  $\{11\bar{2}0\}$  плоскостями скольжения. С увеличением частоты ультразвука температура локализации максимумов смещается в сторону более высоких температур.

После выдержки экструдированных образцов при комнатной температуре кривые  $\Delta\alpha_L(T)$  несколько видоизменились, сохранив при этом экстремальный вид, что



указывает на идущий процесс деформационного старения экструдатов. После отжига при  $T=450\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 часов кривые  $\Delta\alpha_L(T)$  заметно преобразились, проявляя более отчетливое очертание спектральных составляющих протяженного максимума  $\Delta\alpha_L$ , обусловленное отжигом нестабильной части релаксационного спектра, особенно это проявилось при частоте 150 МГц.

Высказывается предположение, что снижение величины скорости продольного ультразвука является результатом двух конкурирующих механизмов, привнесенных деформацией: дефектности (искажение структуры) и наличием текстуры (в силу упругой анизотропии). Наличие максимумов на кривых  $\Delta\alpha_L(T)$  в экструдированных образцах обусловлено суперпозицией термоактивированных релаксационных процессов дислокационного типа, возникающих в призматических и пирамидальных плоскостях скольжения ГПУ кристалла. Величина энергии активации ( $\sim 0,2\text{ eV}$ ), определенная

по спектральным составляющим протяженного пика акустического поглощения при частоте 150 МГц, дает веское основание полагать, что данный процесс имеет природу релаксационного резонанса по типу Бордони. Различие по высоте максимумов, в зависимости от степени деформации, обусловлено как уровнем совершенства деформационной текстуры образцов, так и величиной сдвиговых напряжений, создаваемых звуковой деформацией в плоскости легкого скольжения дислокаций, что подтверждается величиной фактора Шмида 0,43 и 0,76, соответственно, для призматических и пирамидальных плоскостей скольжения. Видоизменение кривых  $\Delta\alpha_L(T)$  после вылеживания экструдатов при комнатной температуре вызвано перераспределением структурных дефектов с их частичной аннигиляцией и рекомбинацией, которые, в силу особенности деформации, сконцентрированы, в основном, в неравновесной зернограничной области.

В докладе будут представлены данные рентгенографии и подробные результаты исследования при частотах 20 и 150 МГц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хаймович, П. А. ФНТ . – 2018. – Т. 44. – С. 463.
2. Brailsford, A. D. Phys. Rev. – 1961. – 122. – P. 778.

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ОБЛУЧЕНИЯ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ  
И СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ Zr,  
СПЛАВОВ Zr1Nb И Zr-2,5%Nb**

Соколенко В.И. , Карасева Е.В. , Мац А.В. , Савчук Е.С.

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина, e-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua

Представлен обзор результатов исследований изменений механических свойств, характеристик ползучести и структурного состояния наноструктурных Zr, сплавов Zr1Nb и Zr-2,5%Nb, связанных с воздействием ультразвука и электронным облучением.

Наноструктурные материалы, получаемые методами больших пластических деформаций, характеризуются высоким уровнем прочностных свойств и пониженными термомеханической устойчивостью и пластичностью, что обусловлено высоким уровнем внутренних напряжений и затруднением реализации основных мод пластической деформации. Одним из видов энергетических воздействий, позволяющих осуществлять релаксацию внутренних напряжений и нормализовать структурное состояние, исключив существенное изменение размера зерен наноструктуры, является ультразвуковое воздействие (УЗВ) с амплитудами ниже статического напряжения течения без накопления усталостных повреждений. При облучении деформированных металлов высокоэнергетическими частицами вследствие генерации радиационных дефектов в дефектной структуре также протекают релаксационные процессы.

Методом комбинированной прокатки при 77-300 К в циркониевых материалах было получено наноструктурное состояние с однородной нанозеренной структурой. Деформированные образцы подвергались ультразвуковому воздействию (УЗВ) при T=300 К (f=20 кГц) и электронному облучению (E=10 МэВ, доза  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>). Испытания на ползучесть проводили в режиме ступенчатого нагружения при T=670 К.

Для наноструктурного сплава Zr-2,5%Nb (средний размер субзерен  $d \approx 94$  нм, уровень внутренних напряжений  $\sigma_{вн} \approx 4$  МПа, объемная концентрация граничной фазы  $C_V^{cp} = 4,69 \cdot 10^{-2}$ ) выявлены эффекты ультразвуковой релаксации, а также структурной неустойчивости при  $\sigma_{УЗВ} = 85$  и 200 МПа соответственно (рис. 1, кр. 2 и кр. 1). После УЗВ

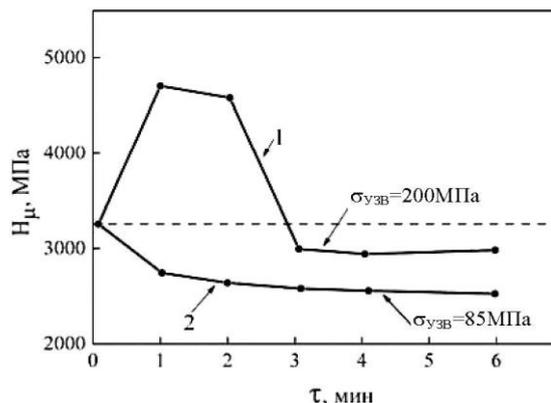


Рисунок 1 – Зависимости  $H_{\mu}$  сплава Zr-2,5%Nb от экспозиции УЗВ:  $\sigma_{УЗВ} = 200$  (1) и 85 МПа (2)

с  $\sigma_{УЗВ} = 85$  МПа на стадии слабой зависимости микротвердости  $H_{\mu}(\tau)$  получили структурное состояние с  $d \approx 78$  нм,  $\sigma_{вн} = 0,1$  МПа,  $C_V^{cp} = 15 \cdot 10^{-2}$ . В результате УЗВ с  $\sigma_{УЗВ} = 200$  МПа и  $\tau_{УЗВ} = 1$  мин формируется структура с  $d \approx 61$  нм,  $\sigma_{вн} = 0,8$  МПа,  $C_V^{cp} = 5,65 \cdot 10^{-2}$ . С увеличением продолжительности УЗВ проявляется неустойчивость структурного состояния: формируется нанозеренная структура с  $d = 98$  нм практически без дальнедействующих напряжений. Этим процессам соответствует стадия резко выраженного разупрочнения на зависимости  $H_{\mu}(\tau)$  (рис. 1).

Для наноструктурного Zr ( $d \approx 80$  нм) в результате УЗВ ( $\sigma_{УЗВ} = 80$  МПа)  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$  снизились на ~ 20 и ~ 8 %, соответственно, пластичность увеличилась на ~ 50 % (рис. 2 а) и возросла скорость ползучести (рис. 3). У сплава Zr1Nb ( $d \approx 60$  нм) эффект ультразвуковой обработки составил ~ 15 % для  $\sigma_{0,2}$  и ~ 5 % для  $\sigma_B$ , пластичность увеличилась почти в два раза (рис. 2 б), но скорость ползучести изменилось незначительно (рис. 3).

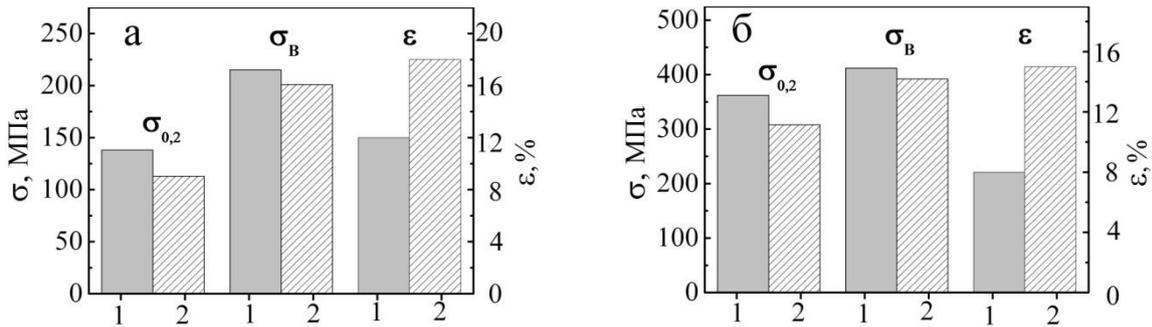


Рисунок 2 – Гистограммы механических характеристик наноструктурных Zr (а) и Zr1Nb (б): (1) – до УЗВ; (2) – после УЗВ

В процессе ползучести Zr при T=670 К исходная наноструктура разрушается и формируется фрагментированная структура с d~0,5 мкм, высокими уровнем внутренних напряжений. По границам фрагментов проходят мощные высокоугловые границы, по которым в дальнейшем могут раскрываться трещины.

УЗВ для наноструктурного Zr не приводит к заметному изменению параметров исходной микроструктуры, однако наблюдаются признаки, свидетельствующие о начале процессов возврата. Вследствие ползучести при T=670 К и  $\sigma \sim \sigma_B$  исходная наноструктура разрушается и образуются слабо разориентированные вытянутые плотные дислокационные скопления.

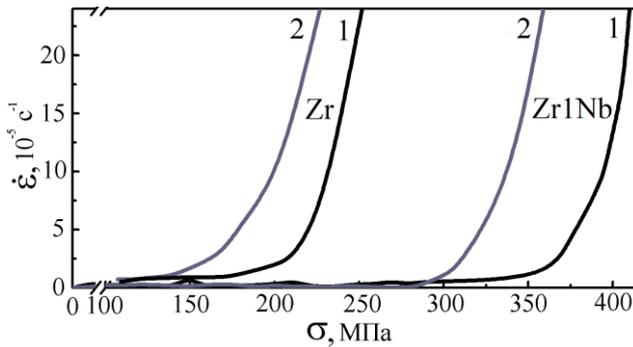


Рисунок 3 – Зависимость скорости ползучести наноструктурных Zr и сплава Zr1Nb от приложенного напряжения: (1) – до УЗВ; (2) – после УЗВ

Наноструктура Zr1Nb является неустойчивой в условиях ползучести при 670 К. Большинство границ разрушается и на их месте формируются дислокационные границы полигонального типа с размером 50–150 нм, что является следствием активизации процес-

сов возврата.

В результате УЗВ наноструктура сплава Zr1Nb становится более равновесной, d увеличивается до 67 нм, что связано с уменьшением числа зерен с малоугловыми границами. В процессе ползучести при 670 К наноструктурного сплава Zr1Nb, подвергнутого УЗВ, происходит релаксация внутренних напряжений вследствие динамической рекристаллизации и образование новой стабильной наноструктуры (d~100 нм), что вызывает заметное повышение термомеханической устойчивости материала.

Таблица 1

Вид обработки	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\epsilon$ , %
Комбинированная прокатки (КП)	132	211	12,0
КП+облучение	114	174	12,5
КП+УЗВ	102	201	18,3
КП+УЗВ+облучение	130	194	18,5

Облучение наноструктурного Zr приводит к уменьшению прочностных характеристик и скорости ползучести при T=670 К, но пластичность материала практически не изменилась (табл. 1).

Эффект облучения наноструктурного Zr с предварительным УЗВ состоит в повышении  $\sigma_{0,2}$  на ~14 %,  $\sigma_B$  на ~12 % и пластичности на ~48 % (табл. 1).

Облучение не изменяет характер деформационной наноструктуры Zr, но

инициирует возвратные процессы в границах зерен и приграничных областях. Наблюдается разупрочнение материала в процессе ползучести при 670 К, пластичность

практически не изменяется, что является следствием активной перестройки структуры и образованием зародышей рекристаллизации.

Предварительная релаксация внутренних напряжений ультразвуком позволяет сохранить достаточно высокий уровень прочности и пластичности наноструктурного Zr после электронного облучения за счет снижения интенсивности динамической рекристаллизации и активизации дополнительной системы скольжения в процессе ползучести при 670 К.

Эффект релаксации напряжений наблюдается и после термообработки наноструктурных Zr и сплава Zr1Nb, что обеспечивает рост пластичности, но при этом разрушается наноструктурное состояние, снижаются прочностные характеристики и увеличивается скорость ползучести. Полученная рекристаллизованная структура обладает низкой термомеханической устойчивостью по отношению к последующему деформированию в условиях ползучести.

Сделан вывод, что ультразвуковая обработка с оптимальными амплитудами расширяет возможности модификации структуры и свойств наноструктурных материалов и может являться эффективной альтернативой или дополнением к релаксационным видам обработки циркониевых материалов, применяемых в атомной энергетике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мац, А. В., Нетесов, В. М., Соколенко, В. И. Ультразвуковое воздействие на наноструктуру сплава Zr-2,5%Nb // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 4. – С. 108–110.
2. Sokolenko, V. I., Gorbatenko, V. M., Karaseva, E. V., Mats, A. V., Savchuk, E. S., Frolov, V. A. Ultrasound influence on the creep nanostructured Zr // Вопросы атомной науки и техники. – 2016. – № 1(101). – С. 41–44.
3. Sokolenko, V. I., Karaseva, E. V., Mats, A. V., Savchuk, E. S., Frolov, V. A. Peculiarities of stress relaxation of nanostructured alloy Zr1Nb after various influences // Вопросы атомной науки и техники. – 2017. – № 4. – С. 79–83.
4. Sokolenko, V. I., Gorbatenko, V. V., Karaseva, E. V., Mats, A. V., Savchuk, E. S., Frolov, V. A. Effect of ultrasonic impact treatment on creep characteristics and evolution of Zr1Nb alloy nanostructure // Functional Materials. – 2018. – 25. – № 3. – P. 458–462.
5. Karaseva, E. V., Mats, A. V., Mats, V. A., Savchuk, E. S., Sokolenko, V. I., Titov, D. V. Effect of electronic radiation on the evolution of nanostructure and creep of Zr at the temperature of 670 K // Вопросы атомной науки и техники. – 2020. – № 1(125). – С. 91–95.
6. Karaseva, E. V., Malykhin, S. V., Mats, A. V., Mats, V. A., Savchuk, E. S., Sokolenko, V. I. Influence of electron irradiation on the structure evolution and creep of Zr1Nb alloy at 380°C // Вопросы атомной науки и техники. – 2021. – (в печати).

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ ПРОВОЛОКИ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ**

**Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Лабецкий В.С.**

*ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»,  
г. Витебск, Беларусь  
labpt@vitebsk.by*

В настоящее время ультрамелкозернистую структуру в материалах в основном получают методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Разработан ряд способов ИПД: многократная прокатка, равноканальное угловое прессование (РКУП), кручение под высоким давлением (КВД), а также опробовано множество модификаций данных методов. Исследование структуры в процессе ИПД показало, что для многих материалов, как чистых, так и многокомпонентных, пластическая деформация является эффективным методом формирования УМЗ структуры. Однако, вышеотмеченные способы ИПД невозможно использовать при изготовлении протяженных изделий. При этом необходимо отметить, что, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению эволюции микроструктуры и свойств металлов и сплавов при деформации высокими степенями ИПД, очень малое количество исследований посвящено изучению материалов, деформированных комбинацией методов ИПД. Кроме того, в литературе слабо освещены модели, объясняющие наблюдаемые эффекты при таких способах обработки. РКУП заключается в деформации заготовок сдвигом в зоне пересечения каналов равного сечения. Заготовка неоднократно прессуется в специальной оснастке через два канала с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися обычно под углом от 90° до 120°. Метод РКУП позволяет получить УМЗ-структуру с размером зерна около 200 нм в массивных образцах диаметром от 10 до 60 мм и длиной от 100 до 350 мм [1]. Недостаток РКУП заключается в том, что с его помощью невозможно обрабатывать протяженные материалы, например, проволоку, ленту и т.п. Попыткой решить эту проблему является непрерывный способ равноканальной угловой свободной протяжки, позволяющий формировать ультрамелкозернистую структуру для достижения комплекса высоких механических свойств сталемедной проволоки [2].

Нами предложен комбинированный способ интенсивной пластической деформации проволоки с наложением ультразвуковых колебаний, включающий РКУ протягивания проволоки, которая осуществлялась с помощью трех неподвижных волок равного диаметра.

Воздействие ультразвука на процесс пластической деформации проволоки оказывает влияние на контактные условия, свойства и структуру деформируемого материала, изменение схемы напряжённого состояния, характер протекания пластической деформации. Действие указанных факторов проявляется в разной степени и зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, выбора волочильного инструмента, скоростных условий протекания процесса обработки.

После ультразвуковой обработки материалов были проведены испытания механических свойств (предел прочности, относительное удлинение, микротвердость), а также термостабильности механических свойств. Зависимость микротвердости деформированного при разных условиях деформирования никеля от температуры отжига представлена на рисунке 1.

Анализ графика показывает, что сначала изменение значений микротвердости образцов никелевой проволоки происходит медленно с ростом температуры, а затем скачком падает до определенного значения. Этот скачок происходит в интервале температур 150–200 °С, а далее снова наблюдается монотонное снижение. Таким образом, можно сказать, что никель, подвергнутый интенсивной пластической деформации, является термически стабильным до температуры 150 °С, а затем его свойства резко изменяются.

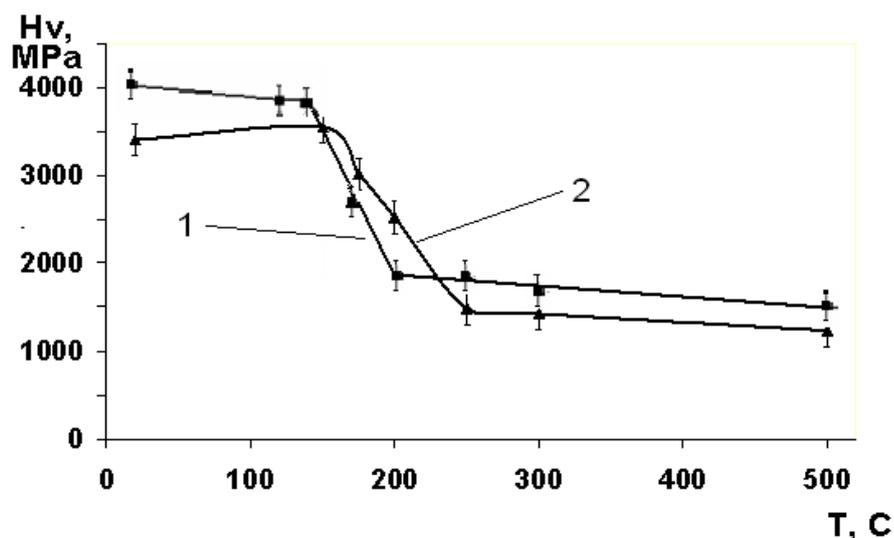


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости деформированной проволоки никеля от температуры нагрева: 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Сталь 12Х18Н10Т относится к аустенитно-мартенситному классу, который имеет в структуре нестабильный аустенит. Особенностью данной стали является возможность широкого изменения механических свойств, как в результате различной термической обработки, так и в результате пластической деформации. В нержавеющих сталях с содержанием хрома и никеля 18–10 основной структурной составляющей, определяющей их поведение при пластической деформации, является аустенит.

Зависимость микротвердости деформированной при разных условиях проволоки из нержавеющей стали от температуры отжига представлена на рисунке 2.

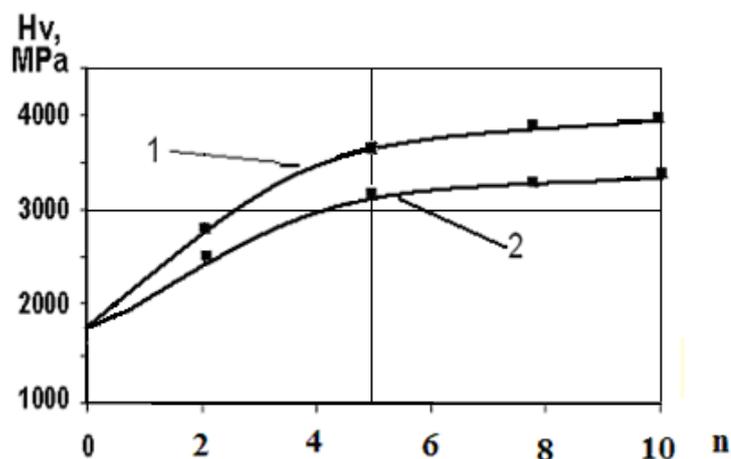


Рисунок 2 – Зависимость микротвердости ( $H_v$ ) деформированной проволоки 12Х18Н10Т от количества проходов РКУ (n): 1 – без УЗК; 2 – с УЗК

Наблюдаемые изменения механических свойств проволоки 12Х18Н10Т (рис. 2), по-видимому, связаны как со снижением напряжений деформации при ультразвуковой РКУ деформации, так и некоторым повышением температуры деформации материала за счет поглощения акустической энергии [3, 4].

Структуру образцов никеля исследовали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2. Спектры дифракции обрабатывали с помощью программы Crystal Impact Match Version 1.11. Рентгенограммы образцов НР2 после пластической деформации при различных условиях представлены на рисунке 3.

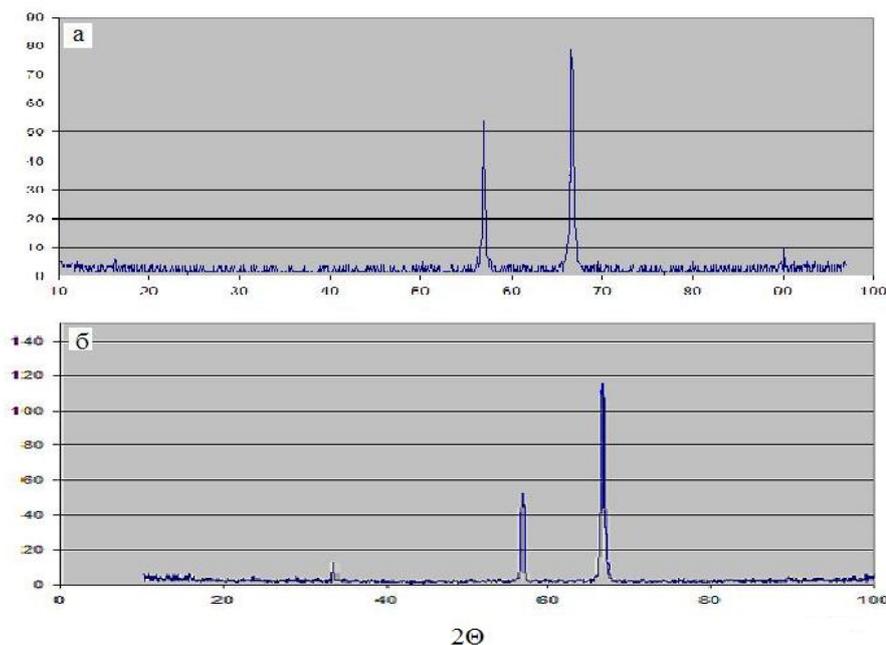


Рисунок 3 – Рентгенограммы проволоки НП2 после 5 проходов:  
а – УЗО; б – РКУ протягивание без УЗК

После УЗО интенсивность линии (200) никеля изменяется не значительно, а линии (220) заметно снижается. Уменьшение интенсивности пика (220) указывает на изменение текстуры образцов при ультразвуковой обработке при РКУ протягивании.

**Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T19-067).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М., 2007. – 397 с.
2. Исследование особенностей структурообразования в процессе интенсивной пластической деформации углеродистых конструкционных сталей / М. В. Чукин [и др.] // Черные металлы. – 2011. – № 7/8. – С. 25–28.
3. Рубаник, В. В. Влияние ультразвука на физико-механические свойства проволоки при равноканальном угловом протягивании / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 94–102.
4. Царенко, Ю. В., Рубаник, В. В., Лабетский, В. С. Деформационное измельчение структуры в проволоке с использованием ультразвуковой обработки // Актуальные проблемы прочности. Матер. межд. науч. конф.; под ред. В. В. Рубаника. 2020. – С. 355–357.

## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

**Царенко Ю.В.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Петрова-Буркина О.А.<sup>1</sup>, Wang J.T.<sup>2</sup>,  
Liu Y.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г.Витебск, Беларусь

<sup>2</sup>Нанкинский университет науки и технологии, г.Нанкин, КНР

e-mail: labpt@vitebsk.by

Метод интенсивной пластической деформации (ИПД) кручением под высоким давлением признан одним из эффективных способов получения наноструктур с размером зерна менее 100 нм в образцах малого размера, пригодных для проведения большинства фундаментальных исследований [1]. Предложенный в [2] способ интенсивной пластической деформации t-HPS (tube high-pressure shearing) позволяет получать более протяженные образцы. В этом способе процесс сдвига обусловлен трением между инструментом и образцом под высоким гидростатическим давлением, при этом плоскость сдвига параллельна радиусу трубчатого образца во время процесса. Объемную нанопластинированную структуру никеля получали также посредством двухэтапного процесса, включающего первичное измельчение зерна равноканальным угловым прессованием с последующей прокаткой в жидком азоте [3].

Для обработки образцов наноструктурного никеля и меди путем ультразвукового воздействия с точки зрения эффективности знакопеременного механического воздействия использован способ, в котором обработка образцов осуществляется в пучности напряжений стоячей волны волновода в закрепленном состоянии [4].

Обрабатываемый образец из наноматериала закреплялся внутри полости волновода в пучности напряжений с помощью специального винта, обеспечивая надежный акустический контакт между волноводом и обрабатываемым образцом. Питание преобразователя ПМС15А-18 осуществляли от ультразвукового генератора УЗГ2-4М.

Ультразвуковая обработка образцов проводилась с амплитудой знакопеременных напряжений в образцах от 17,5 до 70 МПа. Обработка наноструктурных образцов никеля и меди выполнялась при различных усилиях поджатия в пучности напряжений волновода. Усилия поджатия образцов изменяли в пределах 17-34 кН. При проведении ультразвуковой обработки образцов контролировали температуру волновода, при максимальных значениях знакопеременных напряжений его температура не превышала 60 °С. Время ультразвуковой обработки образцов составляло 30 с.

Для определения размера зерен, микродеформаций и других количественных параметров структуры ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов применяли метод рентгеноструктурного анализа (РСА). Рентгеноструктурные исследования, проводившиеся на образцах никеля, полученных методами ИПД, показывают наличие искажений решетки, значительных микронапряжений, которые вызывают уширение рентгеновских пиков [5]. Также обнаруживается, что размер областей когерентного рассеяния, полученный методом РСА, заметно меньше размера зерен, рассчитанного из электронно-микроскопических снимков, для всех случаев деформационной обработки.

После ультразвуковой обработки по различным режимам образцов наноструктурированного никеля и меди были проведены рентгеноструктурные исследования. Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре фирмы Bruker Advance D8.

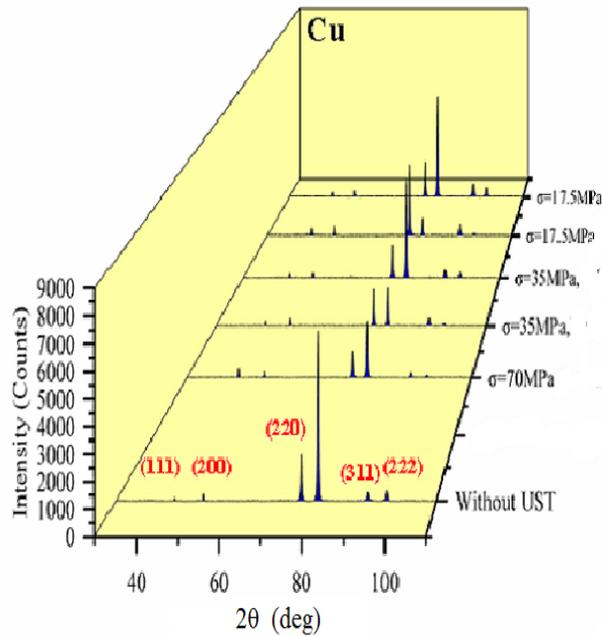


Рисунок 1 – Зависимость интенсивностей рентгеновских линий образцов наномеди после УЗО при различных значениях амплитуды знакопеременных напряжений

Аналогичные зависимости интенсивностей рентгеновских линий от режимов ультразвуковой обработки были получены и для образцов наноструктурного никеля. Изменение интенсивности на пике линии (220) указывает на то, что произошло изменение текстуры наноструктурированных образцов за счет ультразвуковой обработки.

Исследована структура и механические свойства наноструктурных образцов никеля и меди до и после ультразвуковой обработки. Установлено, что после УЗО наблюдается рост среднего размера зерна образцов наномеди (рис. 2), при этом плотность дислокаций уменьшается более чем на 40 %.

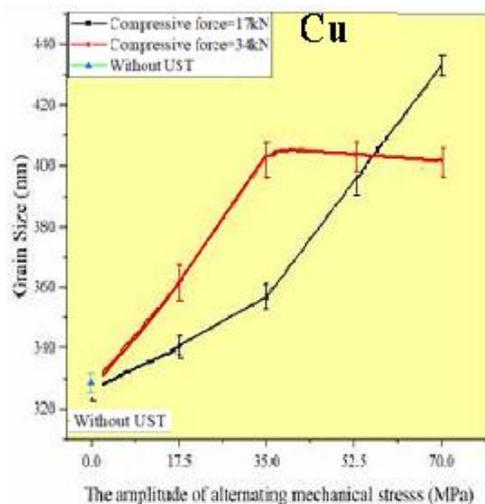


Рисунок 2 – Изменение размера зерна наномеди после УЗО

Размер зерна наноникеля после ультразвуковой обработки практически не меняется, а плотность дислокаций при этом несколько возрастает с увеличением амплитуды знакопеременных напряжений.

Микродеформации нанообразцов после УЗО, которые были исследованы методом РСА, имеют различный характер зависимости от амплитуды знакопеременных напряжений. Микродеформации образцов наномеди после УЗО

монотонно снижаются примерно на 20 %, в тоже время для наноникеля изменение величины микродеформации при УЗО не превышает 6–7 %.

Результаты измерений микротвердости наноструктурных образцов меди и никеля после различных режимов обработки представлены в таблице.

Таблица 1 – Микротвердость образцов наномеди и наноникеля

Обработка образца	Амплитуда УЗО, МПа	HV0.98, МПа
Nano-Cu	-	151,4
Nano-Cu +УЗО	17.5	163,3
Nano-Cu +УЗО	70	153,2
Nano-Cu +УЗО	35	148,0
Nano-Ni	-	437,0
Nano-Ni +УЗО	17.5	492,7
Nano-Ni +УЗО	35	473,0
Nano-Ni +УЗО	70	420,5

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что при малых амплитудах ультразвука (17,5 МПа) наблюдается заметный рост (около 14 %) микротвердости наноструктурных образцов, как меди, так и никеля. Дальнейшее увеличение интенсивности ультразвуковой обработки приводит к снижению микротвердости исследованных нанометаллов до уровня образцов без УЗО.

**Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект T19КИТГ-003).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен, П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва / П. В. Бриджмен. – М.: Иностранная литература, 1955. – 444 с.
2. Wang, J. T., Li, Z., Langdon, T. G. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing // *Scr. Mater.* – 2012, 67, 810.
3. Valiev, R. Z., Langdon, T. G. Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement // *Progress in Materials Science*, Vol. 51, No. 7, 2006, pp. 881–981.
4. Царенко, Ю. В. Ультразвуковая обработка нанометаллов, полученных деформационными методами / Ю. В. Царенко, В. В. Рубаник, В. Ф. Луцко, В. Г. Самолетов, Jing Tao Wang, Yuwei Liu // *Актуальные проблемы прочности: материалы межд. науч. конф., Витебск, 25-29 мая 2020 года / под ред. В. В. Рубаника.* – Молодечно: Победа, 2020. – С. 366–368.
5. Hanges in the Microstructure and Mechanical Properties of Nanomaterials under an Ultrasonic Wave Effect / A.A. Nazarov, A.A. Samigullina, R.R. Mulyukov, Yu.V. Tsarenko, V.V. Rubanik // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* – 2014. – Vol. 43. – № 2. – pp.153–159.
6. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment / A. A. Samigullina, A. A. Mukhametgalina, S. N. Sergeev, V. V. Rubanik, Y. V. Tsarenko et al // *Ultrasonics.* – 2018. – V. 82. – pp. 313–321.

## **ПОВЫШЕНИЕ ТИРАЖЕСТОЙКОСТИ ФЛЕКСОГРАФСКИХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ ПУТЕМ ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ**

**Грудо С.К.**

*УВО «БГТУ», г. Минск, Республика Беларусь, grudo@belstu.by*

При воспроизведении высококачественной печатной продукции флексографским способом возникают технологические проблемы, связанные, например, с проработкой мелких деталей или потерей контраста изображения в процессе печати тиража. Часто эти проблемы определяются свойствами формного материала, которые играют одну из основных ролей в достижении качества печатного оттиска, что делает актуальным проведение исследований в области повышения печатно-эксплуатационных свойств флексографских фотополимерных печатных форм.

В настоящее время прослеживается тенденция совершенствования технологии изготовления цифровых флексографских печатных форм для получения не только высокотиражной, но и высококачественной печатной продукции, а также переход на более экономичные и экологичные формные материалы. Многофакторность основных процессов изготовления цифровых фотополимерных печатных форм, а также использование визуально-тестирующего метода контроля получения рельефной растровой структуры, не всегда позволяют добиться высоких параметров прочности, заявленных производителями пластин.

В данной работе предложено решение существующих проблем, в котором повышение печатно-эксплуатационных характеристик флексографских форм достигается за счет проведения дополнительного способа модификации полимерного материала. Оно заключается в приложении к фотополимерной композиции печатных форм энергии ультразвуковых колебаний. Данный способ позволяет без изменения химического состава целенаправленно влиять на эксплуатационные свойства полимерного материала и является экологически чистым. Научный интерес представляет предложенный способ повышения тиражестойкости флексографских печатных форм за счет проведения ультразвуковой модификации [1], который заключается в том, что ультразвуковое воздействие осуществляется отдельно по зонам, на которые разбивается поверхность фотополимера, а ультразвуковой рабочий инструмент приводится в контакт с поверхностью каждой из зон с усилием, равным произведению среднего значения относительной площади растровых точек в этой зоне, выраженного в процентах, на максимально допустимую величину указанного усилия, равную  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ .

Для того, чтобы подтвердить воздействие УЗ-колебаний на фотополимерную композицию, было разработано научное объяснение механизма физико-химических процессов, происходящих в материале фотополимерной формы, и влияние этих процессов на печатные и эксплуатационные свойства фотополимерной композиции.

Для определения состава полимерного материала и материала подложки использовался метод инфракрасной спектроскопии (ИКС), проведенный в Центре физико-химических методов исследования БГТУ (г. Минск). По результатам исследований формного материала было установлено, что основу фотополимерной композиции водовывывной флексографской формы может составлять синтетический эластомер, подобный полиуретану [2].

Очевидно, что прочность связей между отдельными атомами определяет физико-механические свойства материалов. Для разрыва этих связей во всех молекулах, имеющих в 1 моле вещества, необходимо совершить работу, которая обозначается как энергия химической связи. Энергия химической связи – равна

работе, которую необходимо затратить, чтобы разделить молекулу на две части (атомы или группы атомов) и удалить их друг от друга на некоторое расстояние. Энергия химической связи – частный случай энергии связи, обычно ее выражают в кДж/моль (ккал/моль); в зависимости от частиц, образующих химическую связь, характера взаимодействия между ними (ковалентная связь, водородная связь и другие виды химической связи), кратности связи (например, двойные, тройные связи) энергия химической связи имеет величину от 8–10 до 1000 кДж/моль. В химии прочность этих связей объясняется различными способами перекрытия электронных облаков, связываемых атомов. Связь между атомами, получаемая боковым перекрытием электронных облаков, называют π-связью, которая, как и в случае с σ-связями, в зависимости от вида перекрывающихся облаков, может иметь различную разновидность.

В нашем случае для обеспечения дополнительной сшивки молекул фотополимера, основу которого составляет синтетический каучук (полиуретан), необходимо разорвать слабую π-связь. Для этого необходимо приложить энергию больше, чем энергия этой связи, но меньше энергии σ-связи (рис. 1).

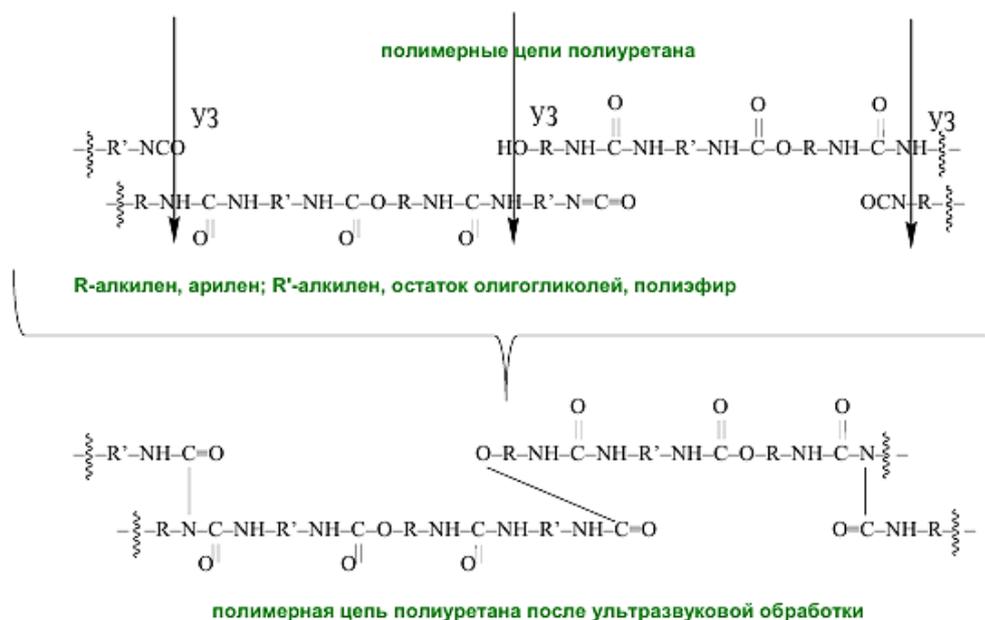


Рисунок 1 – Химическая модель процесса полимеризации (сшивки)

В процессе ультразвукового воздействия поглощаемая энергия оказывает воздействие на непрореагировавшие функциональные группы макромолекул полиуретана и интенсифицирует процесс образования дополнительных связей за счет взаимодействия реакционноспособных изоцианатных групп с производными, содержащими активный атом водорода. Рекомбинация макрорадикалов в результате воздействия ультразвука позволяет им присоединяться к основным полимерным цепям в виде линейных или боковых ветвей с образованием новых более стабильных связей. Кроме того, процесс сшивания происходит за счет взаимодействия водородных атомов карбамидных мостиков с концевыми изоцианатными группами исходной цепи полимера с образованием биуретановых групп, что делает структуру полимера более разветвленной, а значит и более прочной.

С целью практической реализации, обобщения и комплексной оценки предлагаемого способа модификации фотополимерного материала печатных форм была разработана опытная ультразвуковая установка (рис. 2), которая осуществляет ультразвуковую финишную обработку рабочих поверхностей флексографских печатных форм по зонам [3].



Рисунок 2 – Экспериментальная ультразвуковая установка

Установка структурно состоит из ультразвукового генератора модели ВНТ77 и двухполуволновой акустической системы, которая включает целый ряд узлов и систем, в частности колебательную систему 1, содержащую экспоненциальную концентрирующую накладку с рабочим инструментом, отражающую цилиндрическую накладку, два пьезоэлектрических преобразователей, расположенных между вышеуказанными накладками и акустически связанных между собой с тяжким элементом. Ультразвуковой генератор разработан по схеме с независимым возбуждением, автоподстройкой частоты и предназначен для возбуждения механических колебаний ультразвуковой частоты в пьезоэлектрических преобразователях в полосе частот 35 ... 45 кГц и потребляемой мощностью не менее 100 Вт.

В соответствии с предложенным способом модификации ультразвуковое облучение осуществляется по зонам, на которые разбивается каждая цветоделенная флексографская фотополимерная печатная форма, при необходимом прижиме и акустическом контакте между рабочей поверхностью ультразвуковой установки и поверхностью печатной формы. Усилие каждого позонного акустического контакта определяется как произведение среднего значения относительной площади растровых точек этой зоны, выраженного в процентах, на максимально допустимую величину усилия, равную  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ .

Проведение ультразвукового облучения данной установкой опытных образцов печатной формы позволило определить экспериментальные зависимости параметров облучения на физико-механические свойства фотополимерного материала и дать оценку разработанному способу модификации формного материала. Было установлено, что ультразвуковая обработка поверхности формных образцов с акустической мощностью 3,5 Вт, частотой колебаний 40 кГц и усилием акустического контакта 0,1 Н интенсифицирует процесс дополнительной поперечной сшивки, что делает структуру полимера формного материала более разветвленной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ изготовления цифровой фотополимерной флексографской печатной формы : пат. ВУ 19448 / С. А. Барташевич, С. К. Грудо, С. В. Медведев. – Опубл. 30.08.2015.
2. Грудо, С. К. Микроструктурный анализ водовывывных флексо-графских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудо // Науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Львов, 10-14 февраля 2016 г. : тез. докл. / Укр. акад. печати ; редкол.: Б. В. Дурняк [и др.]. – Львов, 2016. – С. 12.
3. Bartashevich, S. A. Development of experimental ultrasound device for modification of flexographic photopolymer printing plates / S. A. Bartashevich, S. K. Grudo, S. A. Khokhriakov // Поліграфія і видавнича справа (Printing and Publishing). – 2015. – № 1 (69). – С. 84–92.

## PROPERTIES OF RUBBER-BASED POLYMERS MODIFIED WITH GRAPHENE STRUCTURES

Rubanik V.V.<sup>1</sup>, Savitski V.O.<sup>1</sup>, Rubanik V.V.jr.<sup>1</sup>, Bui Hung Thang<sup>2</sup>,  
Doan Dinh Phuong<sup>2</sup>, Pham Van Trinh<sup>2</sup>, Nguyen Viet Dung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Technical Acoustics of NAS of Belarus,  
Vitebsk, Belarus, ita@vitebsk.by*

<sup>2</sup>*Institute of Materials Science, VAST, Hanoi, Vietnam*

Elastomers that can be processed into rubber are called rubbers. One of the most widespread types of polymeric materials is rubber. Elastomers include natural rubbers obtained from high molecular weight rubbers by vulcanization, sealants, adhesives obtained from liquid oligomeric or rubber-oligomeric compositions, and various types of thermoplastic elastomers, including thermoplastic rubbers and dynamic vulcanizates.

A method of manufacturing filled rubbers has a significant effect on their chemical composition, the distribution of the filler, the degree of its dispersion, the strength of interaction with the polymer, plastic and elastic properties of rubbers, technological properties of mixtures and technical properties of rubbers. Filling of rubbers in latex stage has become a prominent area of current research and development. The liquid-phase method can be used to obtain compositions with practically any filler, evenly distributed in a polymer phase, while the degree of filling can vary within wide limits [1].

Liquid-phase exfoliation of graphite using sonication process is applied to produce graphene, which is formed from thin nanoflakes with a large surface area. Thus, the unique combinations of chemical and mechanical characteristics of graphite nanolayer make it good nanofiller for the synthesis of high-strength polymer nanocomposites, and, in particular, rubber-based nanocomposites.

The properties of the polymer composite material are determined not only by the degree of filling and the filler materials and binder, but also by the shape, size and the mutual arrangement of the filler particles. Compared to analogs with macro- and microcomponents, nanocomposite materials show an increase in characteristics or appearance of new ones. The widespread application of nanoparticles in composite materials is constrained by the tendency of nanoparticles to stick together and form aggregates, since the sticking of nanoparticles prevents their surface from interacting with other materials. The destruction of such aggregates makes it possible to use the potential of nanoparticles. Today, the destruction of aggregates of nanoparticles in liquid media using ultrasonic vibrations is considered to be the most promising method, i.e. ultrasonic dispersion of nanoparticles [2], since the effect of ultrasound makes it possible to obtain highly dispersed (average particle size – microns and fractions of microns), homogeneous and chemically pure suspensions [3]. For example, there is a known method of obtaining filled rubber crumb by mixing latex emulsion in an aqueous suspension of precipitated silicon dioxide, followed by coagulation of the mixture and drying.

To increase the degree of dispersion of the filler in the rubber matrix, the preparation of an aqueous suspension of the filler and mixing it with latex is carried out using ultrasound [4].

It should be noted that the dispersion of nanoparticles in thin films, gels, and liquids is one of the challenges to fully exploit the potential of nanoparticles.

To obtain polymers, the natural rubber (SVR-3L, Vietnam), silicon dioxide 20% wt. and graphene carbon particles obtained by ultrasonic exfoliation of graphite [5] (0 wt.%, 1 wt.%, 10 wt.% and 20 wt.% of the polymer weight) as additives were used in this study. The introduction and dispersion of graphene additives and SiO<sub>2</sub> into the polymer solution was carried out using an ultrasonic UZDN-2M dispenser with a power of 0.4 kW and a frequency of 22 kHz.

The procedure of obtaining a nanopolymer based on natural rubber SVR-3L consisted of 4 stages: the preparation of a 4% film-forming polymer (4% rubber and 96% xylene); the introduction of a 4% solution of a film-forming polymer 20% wt. SiO<sub>2</sub> to the mass of rubber and ultrasonic treatment until complete dissolution (≈5 minutes); the introduction of

specified concentrations of graphene-containing material in the experimental rubber samples containing 20% wt. SiO<sub>2</sub>, ultrasonic treatment until complete dissolution (≈7 minutes); pouring onto substrates, hardening.

The addition of graphene structures caused a color change in the obtained polymers. The decomposition of the plasticizer in the polymer occurred in the temperature range from 200 to 300 °C. The decomposition of the elastomer was in the range from 340 to 385 °C and from 440 to 480 °C (Figure 1).

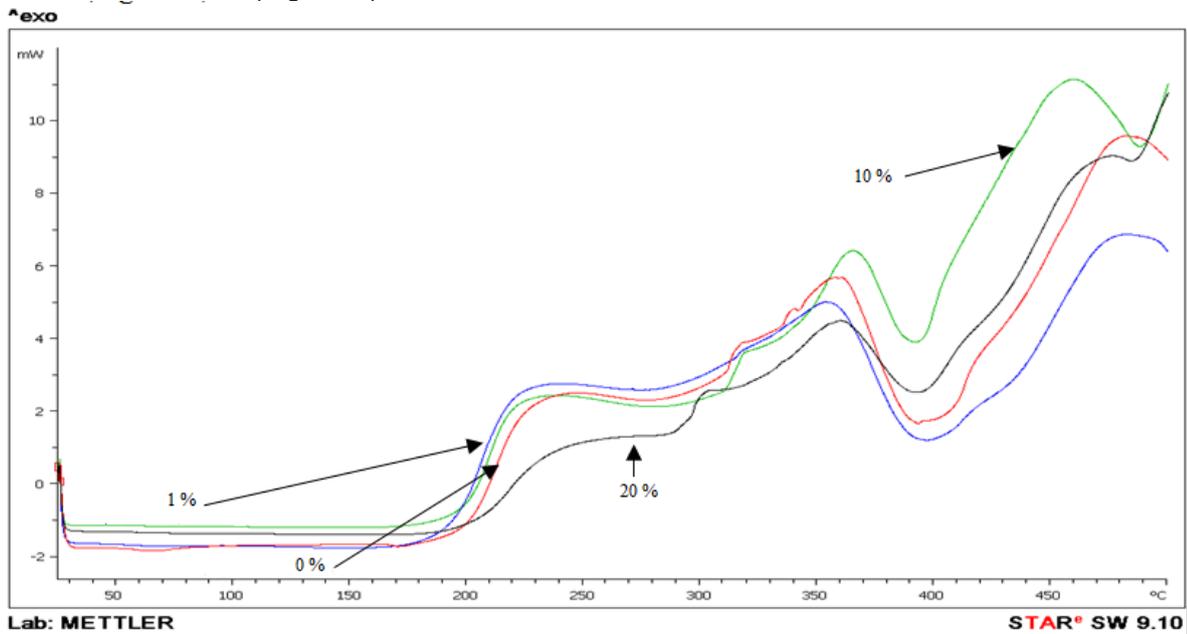


Figure 1 – DSC curves of rubber-based polymers with different graphene content

The tensile strength of the natural rubber polymer without the graphene additives was 1.9 MPa. The increase in the concentration of the graphene additives leads to an increase in strength and a decrease in relative elongation (Figure 2).

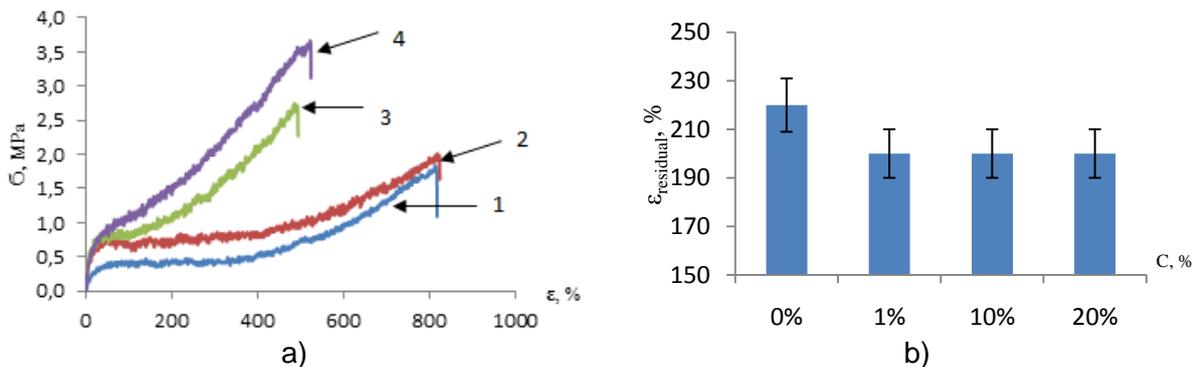


Figure 2 – Dependence of ultimate strength on elongation (a) and residual elongation on the concentration of graphene inclusions (b) of natural rubber nanoparticles: 1 – 0% wt., 2 – 1% wt., 3 – 10% wt., 4 – 20% wt.

The tensile strength increased to 2 MPa by addition of 1% wt. of graphene, and the elongation did not change. The tensile strength sharply increased to 2.7 MPa by the addition of 10% wt. of the graphene-containing additive, and a decrease in the relative elongation from 810 to 480% was observed. The tensile strength of the polymer containing 20% wt. of graphene-containing additive was 3.6 MPa, and the relative elongation increased to 510% (Figure 2a), which was in good agreement with the results of other studies [6].

The residual elongation of the samples did not change within the error and amounted to 200% (Figure 2b).

Thus, the addition of graphene structures to polymers leads to a significant increase in their strength characteristics. The tensile strength of polymers based on rubber containing 20% wt. of graphene structures is 3.6 MPa, which is twice as much as without the addition.

***This work was supported by the BRFFR (project No. T19V-009).***

#### REFERENCES

1. Modification of synthetic rubbers in order to improve the elastic-strength properties of elastomeric compositions / R. M. Dolinskaya, N. R. Prokopchuk, Yu. V. Korovina // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technology, biotechnology, geoecology. – 2015. – P. 29–36.
2. Burakova, E. A., Mikhaleva, Z. A. Investigation of the influence of ultrasound on the dispersion characteristics of carbon nanomaterials // Fundamental and applied research, innovative technologies, professional education: collection of articles. Works of XII scientific. conf. TSTU / Tamb. state tech. un-t. – Tambov, 2007. – 224 p.
3. Klubovich, V. V., Rubanik, V. V., Markova, L. V., Rubanik, V. V. jr., Mozzharov, S. E. Influence of ultrasonic vibrations on the structure of carbon nanomaterial: Physical materials science. Nanomaterials for technical and medical purposes: collection of articles. Materials III Int. schools, Togliatti, September 24-28, 2007. – Togliatti, 200. – P. 175–177.
4. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya (Ultrasound: A Brief Encyclopedia), Golyamin, I.P., Ed. – Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 1979.
5. The use of ultrasonic vibrations in the preparation of graphene structures in a solvent / Rubanik V. V., Savitsky V. O. et al // Advanced materials and technologies: collection of articles of the international symposium, May 27-30, 2019, Brest, Belarus // –Vitebsk: VSTU, 2019. – P. 490–493.
6. Modification of synthetic rubbers in order to improve the elastic-strength properties of elastomeric compositions / R. M. Dolinskaya, N. R. Prokopchuk, Yu. V. Korovina // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technology, biotechnology, geoecology. – 2015. – P. 29–36.

## ULTRASONIC LIQUID-PHASE EXFOLIATION OF GRAPHITE AT EXCESSIVE HYDROSTATIC PRESSURE

**Rubanik V.V.<sup>1</sup>, Savitski V.O.<sup>1</sup>, Rubanik V.V.jr.<sup>1</sup>, Lutsko V.F.<sup>1</sup>, Labetski V.S.<sup>1</sup>,  
Bui Hung Thang<sup>2</sup>, Doan Dinh Phuong<sup>2</sup>, Pham Van Trinh<sup>2</sup>, Tran Van Hau<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Technical Acoustics of NAS of Belarus,  
Vitebsk, Belarus, ita@vitebsk.by*

<sup>2</sup>*Institute of Materials Science, VAST, Hanoi, Vietnam*

Graphene is a promising material for electronics, medicine, automotive industry, etc. There are different methods to obtain graphene particles [1, 2] and synthesis graphene [3, 4]. They are micromechanical exfoliation of graphite, chemical exfoliation of graphite, chemical vapor deposition growth of graphene, graphene growth on silicon carbide (SiC) substrates, liquid-phase exfoliation of graphite.

High quality graphene sheets can be obtained by liquid-phase exfoliation of graphite [5, 6]. The splitting of graphite crystallites into single graphene sheets using ultrasound can be conducted both in an aqueous solution in the presence of surfactants and in non-aqueous solutions.

The aim of this work was to obtain the graphene structures by ultrasonic separation of the graphite planes in different solvents at excessive hydrostatic pressure. This method ensures the preservation of the structure of monolayers of the initial graphite excluding oxidation process [7].

The high-purity graphite powder of 900 mg placed in a 150 ml solvent was used to prepare a graphite suspension. The ultrasonic treatment of the graphite suspension was carried out using an UZG-2-4M generator with a power of 1.5 kW and a frequency of 18 kHz in a cavitation mode for 15 min at excessive hydrostatic pressure (Figure 1). The cavitation intensity was controlled using an INDICATOR IC-3M cavitometer developed at BSUIR (Minsk) [8]. The dried samples of suspensions of fixed concentration of graphite were studied by X-ray diffraction analysis using a DRON-2 diffractometer equipped with an X-ray tube with an iron anode. The previous studies have shown the influence of different solvents on the graphene structure using liquid-phase exfoliation of graphite [9]. Benzene, dimethylformamide, ortho-xylene, acetone, dichlorobenzene, and dichloroethane were selected as solvents. The sonication time was 15 min. It was found that the initial graphite exhibited the intense peak at  $2\theta \approx 33.8^\circ$ . During ultrasonic treatment the intensity of this peak decreased as the concentration of graphite in the suspension decreased and the concentration of graphene particles increased [7]. Ultrasonic treatment of suspensions of dichlorobenzene, benzene and dichloroethane causes the decrease of the (002) peak intensity greatly; it indicates the exfoliation of graphite into graphene (Figure 2). The least intense peak was observed for the suspension of dichloroethane. The yield of the graphene structures was found to be up to 66%. Ultrasonic treatment of the suspensions of acetone, ortho-xylene and dimethylformamide did not cause the exfoliation of graphite.

The research results show that the suspensions of dichloroethane, benzene, and dichlorobenzene are more effective for obtaining graphene structures by ultrasonic treatment of solvent-based graphite suspensions. The yield of the graphene structures is up to 66%. The sonication time is 15 min at excessive hydrostatic pressure.

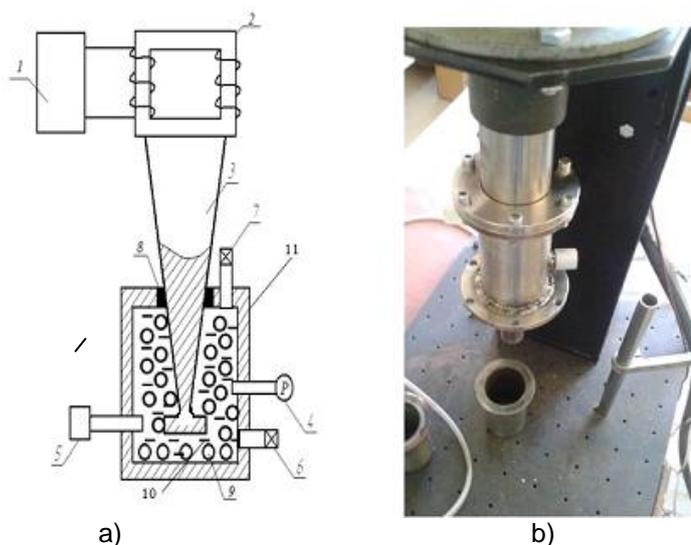
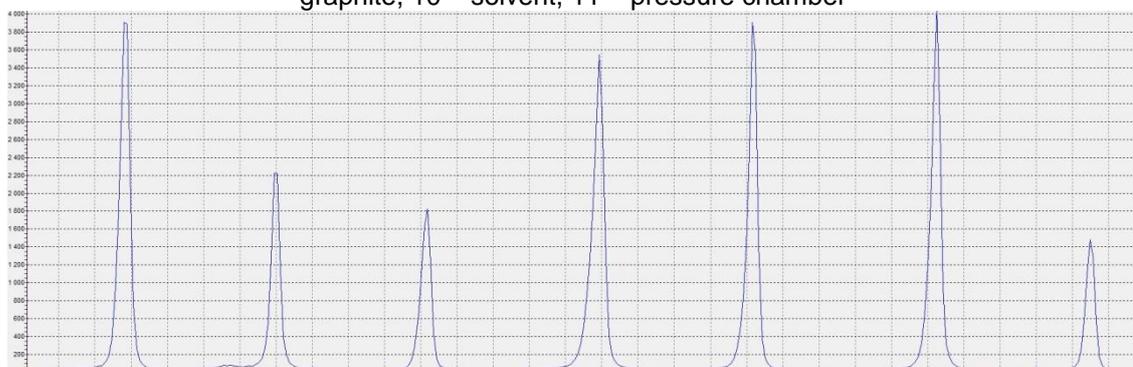


Figure 1 – Schematic design (a) and external view (b) for the ultrasonic unit for liquid-phase exfoliation of graphite: 1 – ultrasonic generator, 2 – magnetostrictive transducer, 3 – waveguide, 4 – pressure gauge, 5 – cavitometer, 6 – drain hole, 7 – pressure relief valve, 8 – gasket seal, 9 – finely-dispersed graphite, 10 – solvent, 11 – pressure chamber



Initial graphite dichlorobenzene benzene DMF acetone ortho-xylene dichloroethane  
Figure 2 – Intensities of the 002 line of the initial graphite and graphite suspensions after ultrasonic treatment at excessive hydrostatic pressure ( $P = 2.5$  atm)

**This work was supported by the BRFFR (project No. T19V-009).**

#### REFERENCES

1. A roadmap for graphene / K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo et al // Nature.– 2012. – Vol. 490. – N. 7419. – P. 192–200.
2. Production, properties and potential of graphene / C. Soldano, A. Mahmood, E. Dujardin // Carbon. – 2010. – Vol. 48 – N. 8. – P. 2127–2150.
3. A roadmap for graphene / K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo et al // Nature. – 2012. – Vol. 490. – N. 7419. – P. 192–200.
4. Soldano, C. Production, properties and potential of graphene / C. Soldano, A. Mahmood, E. Dujardin // Carbon. – 2010. – Vol. 48. – N. 8. – P. 212–215.
5. Liquid phase production of graphene by exfoliation of graphite in surfactant/water solutions / M. Lotya, Y. Hernandez, P. J. King et al. // Journal of the American Chemical Society. – 2009. – Vol. 131. – N. 10. – P. 361–362.
6. High-concentration solvent exfoliation of graphene / U. Khan, A. O'Neill, M. Lotya et al. // Small. – 2010. – Vol. 6. – N. 7. – P. 864–871.
7. Obtaining graphene structures in graphite with benzene under the action of ultrasound / Baitimbetova B. A. et al // Combustion and Plasma Chemistry. – 2013. – V. 11, No. 1. – P. 76–82.
8. Режим доступа: <https://cavitation.bsuir.by/kavitometr>.
9. The use of ultrasonic vibrations in the preparation of graphene structures in a solvent / V. V. Rubanik, V. O. Savitski et al // Advanced materials and technologies: collection of materials of the international symposium, May 27-30, 2019, Brest, Belarus. – Vitebsk, "VSTU", 2019. – P. 490–493.

## СИНТЕЗ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНИОНООБМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЛОИСТОГО ДВОЙНОГО ГИДРОКСИДА КОБАЛЬТА-АЛЮМИНИЯ

Критченков А.С.<sup>1,2</sup>, Критченков И.С.<sup>1,3</sup>, Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.мл.<sup>1</sup>,  
Петрова-Буркина О.А.<sup>1</sup>, Константинов П.Е.<sup>1</sup>, Егоров А.Р.<sup>2</sup>,  
Салак А.Н.<sup>4</sup>, Шило А. В.<sup>5</sup>, Пашкевич Ю.Г.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь  
ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>Российский университет Дружбы народов, г. Москва, Россия  
platinist@mail.ru

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

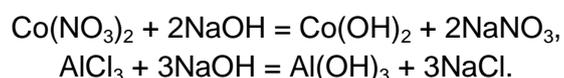
<sup>4</sup>Университет Авейро, г. Авейро, Португалия

<sup>5</sup>Донецкий физико-технический институт НАН Украины, г. Киев, Украина

Слоистые двойные гидроксиды представляют собой класс неорганических соединений, состоящих из положительно заряженных слоев, образованных гидроксидами двух- и трёхвалентных металлов, разделенных подвижными анионами и молекулами воды в межслоевом пространстве. Подобно металлоорганическим полимерам, слоистые двойные гидроксиды могут быть использованы для хранения различных газов, очистки воды, адресной доставки лекарственных средств, систем пролонгированного высвобождения с заданной кинетикой. Слоистые двойные гидроксиды характеризуются выраженными анионообменными свойствами, которые в последнее время привлекают всё большее внимание специалистов в области неорганической химии и материаловедения. Особо актуальной задачей является разработка анионообменных систем на основе слоистых двойных гидроксидов для сорбции органических анионов [1,2]. Эта задача напрямую связана с разработкой систем пролонгированного высвобождения фармацевтических субстанций, так как многие фармакологически активные соединения по своей природе являются органическими анионами.

Цель данной работы заключалась в синтезе (в том числе, при воздействии ультразвуковых колебаний), идентификации и изучении анионообменных свойств слоистого двойного гидроксида  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$ .

Слоистый двойной гидроксид  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$  получали методом соосаждения используя в качестве источников катионов нитрат кобальта(II) и хлорид алюминия, а также гидроксид натрия в качестве осаждающего реагента. Образование гидроксидов кобальта(II) и алюминия протекает в соответствии с уравнениями реакций:



При длительной выдержке при температуре 80 °С происходит созревание слоистого двойного гидроксида  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$  с образованием характерной слоистой структуры. Образовавшийся слоистый двойной гидроксид был охарактеризован с помощью комплекса инструментальных методов анализа, включающих инфракрасную спектроскопию, рентгенодифракционный анализ (порошковая дифракция), комплексный термический анализ (термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия), а также сканирующую электронную микроскопию. В инфракрасных спектрах обнаружены следующие полосы колебаний:  $\nu(\text{OH}) = 3366,89 \text{ см}^{-1}$ ,  $\delta(\text{OH}) = 1637,99 \text{ см}^{-1}$ ,  $\nu(\text{NO}_3^-) = 1345,57 \text{ см}^{-1}$ ,  $\delta(\text{NO}_3^-) = 817,87 \text{ см}^{-1}$ . Колебания в области 580,72 – 423,31  $\text{см}^{-1}$  относятся к колебаниям М–О и М–О–М, где

M = Co, Al. Данные рентгенодифракционного и комплексного термического анализов также согласуются с предполагаемым составом слоистого двойного гидроксида. Изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 1.

Полученный слоистый двойной гидроксид  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$  был протестирован на анионообменные свойства в отношении 2-меркаптобензимидазола в его анионной форме. Анионообменные свойства полученного слоистого двойного гидроксида проводили в сравнении с аналогичными свойствами гидроксида кобальта(II) и гидроксида алюминия. В результате было выявлено, что при обработке раствора 2-меркаптобензимидазола в его анионной форме слоистым двойным гидроксидом  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$  концентрация органического аниона уменьшается на 46 %, в то время как при использовании гидроксида кобальта(II) и гидроксида алюминия – на 4 %.

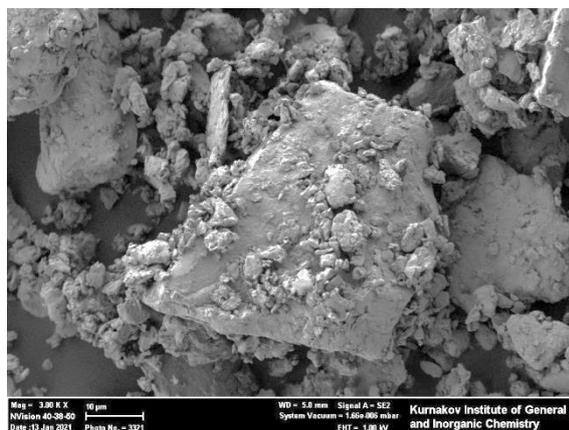


Рисунок 1 – Микроструктура слоистого двойного гидроксида  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$

В работе также исследовалась возможность применения ультразвуковых колебаний (УЗК) для ускорения и сокращения числа этапов синтеза слоистого двойного гидроксида  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$ . Суспензия, получившаяся после стандартной процедуры соосаждения была подвергнута ультразвуковой обработке, минуя стадию длительной выдержки при 80 °С. Ультразвуковую обработку суспензии проводили с помощью погружного волновода на диспергаторе УЗДН-2Т в кавитационном режиме на частоте 22 и 44 кГц в течение 1, 2, 5, 15 и 30 минут. Данные рентгенодифракционного и комплексного термического анализов полностью соответствовали слоистому двойному гидроксиду  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$ , полученному по стандартной методике. Наблюдаемое значительное сокращение времени кристаллизации и гомогенизации кристаллитов обусловлено акустической кавитацией в суспензии за счет ультразвукового воздействия.

Таким образом, в результате выполненной работы получен и охарактеризован слоистый двойной гидроксид  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$  и выявлена его высокая анионообменная способность в отношении 2-меркаптобензимидазола в его анионной форме, многократно превышающая анионообменную способность гидроксида кобальта(II) и гидроксида алюминия. Показано, что ультразвуковая обработка суспензии слоистого двойного гидроксида  $\text{Co}_2\text{Al-NO}_3$  на стадии кристаллизации позволяет существенно снизить продолжительность процесса его синтеза. Результаты данного исследования согласуются с результатами исследований [3,4], в которых также установлена высокая эффективность использования ультразвуковых колебаний на стадии кристаллизации и анионного обмена процесса получения слоистых двойных гидроксидов.

**Работа выполнена в рамках проектов международного сотрудничества при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, Российского фонда фундаментальных исследований, Министерства просвещения и Национальной академии наук Украины (гранты № Т20УКА-020, N0120U000216, РФФИ 20-04-60014).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jijoe, P. S. Fundamentals, synthesis, characterization and environmental applications of layered double hydroxides: a review / P. S. Jijoe, S. R. Yashas, H. P. Shivaraju // Environmental Chemistry Letters. – 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01200-3/>.
2. Santos, G. E. D. Layered double hydroxides/biochar composites as adsorbents for water remediation applications: recent trends and perspectives / G. E. D. dos Santos [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – V.284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.-2020.124755>.
3. Salak, A. N. Sonication accelerated formation of Mg-Al-phosphate layered double hydroxide via sol-gel prepared mixed metal oxides / A. N. Salak [et al.] // Scientific Reports. – 2019. – V. 9:10419. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46910-54>.
4. Salak, A. N. High-Power Ultrasonic Synthesis and MagneticField-Assisted Arrangement of Nanosized Crystallites of Cobalt-Containing Layered Double Hydroxides / A. N. Salak [et al.] // ChemEngineering. – 2019. – V. 3, 62. doi:10.3390/chemengineering-303006212.

ПРОМОТИРУЕМОЕ УЛЬТРАЗВУКОМ АЗИД-ИНОВОЕ 1,3-ДИПОЛЯРНОЕ ЦИКЛОПРИСОЕДИНЕНИЕ В ХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ХИТОЗАНА

Критченков А.С.<sup>1,2</sup>, Критченков И.С.<sup>1,3</sup>, Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.-мл.<sup>1</sup>,  
Петрова-Буркина О.А.<sup>1</sup>, Константинов П.Е.<sup>1</sup>, Егоров А.Р.<sup>2</sup>, Артемьев А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Республика Беларусь,  
ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>Российский университет Дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация  
platinist@mail.ru

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация

Катализируемое Cu(I) азид-иновое 1,3-диполярное циклоприсоединение представляет собой одну из самых широко используемых среди клик-реакций не только для химической дериватизации биоорганических макромолекул (в том числе и полисахаридов), но и вообще в синтетической органической химии. Катализируемое Cu(I) азид-иновое 1,3-диполярное циклоприсоединение под действием ультразвуковых колебаний описано в литературе лишь в единичных случаях и никогда не использовались в химии хитина, хитозана и иных полисахаридов. В рамках данного исследования была изучена модельная реакция катализируемого Cu(I) азид-инового 1,3-диполярного циклоприсоединения пропаргилового эфира бетаина **1** (схема 1, **1**) и азидных диполей NH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH(OH)-CH<sub>2</sub>-N<sub>3</sub> (схема 1, **2a**) или NH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-N<sub>3</sub> (схема 1, **2b**) как в обычных условиях, так и под действием ультразвуковых колебаний.

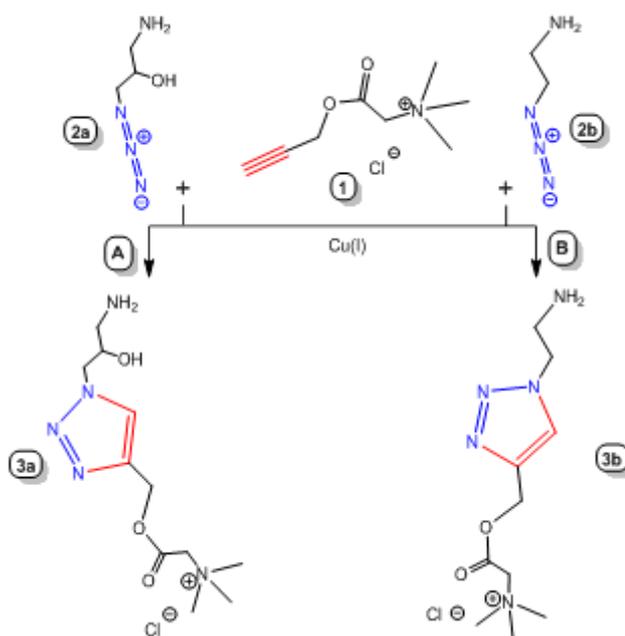


Схема 1 – Модельная клик-реакция промотируемого ультразвуком катализируемого медью(I) азид-алкинового 1,3-диполярного циклоприсоединения

Эксперимент проводили при 25 °С в воде с использованием классической каталитической системы CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O/аскорбат натрия в атмосфере азота. Мольное соотношение представленных на схеме 1 реагентов **1:2a** (или **2b**):CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O:аскорбат натрия составляло 1.1:1:0.05:0.1. Реакционные смеси обрабатывали ультразвуком частотой 50, 100 и 200 кГц мощностью от 120 до 300 Вт. При обработке реакционных смесей ультразвуком частотой 45 кГц мощностью 120 Вт реакция заканчивается за 25 минут, в то время как частоте 100 кГц и мощности 300 Вт реакция заканчивается всего лишь за 10 минут с образованием **3a** и **3b** с количественными выходами (схема 1). При обработке ультразвуком частотой 200 кГц и мощностью 120 Вт реакция теряет селективность.

Также был проведён скрининг различных солей меди на предмет их каталитической эффективности как в атмосфере азота, так и на воздухе. Эффективность каталитических систем на основе меди в анаэробных условиях для обеих модельных реакций А и В (**схема 1**) одинакова и уменьшается в следующем порядке:  $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}/\text{аскорбат натрия} \approx \text{Cu}(\text{проволока})/\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O} > \text{CuCl} > \text{CuBr} > \text{CuI}$ . Почти все каталитические системы теряют свою активность в аэробных условиях, однако активность каталитической системы  $\text{Cu}(\text{проволока})/\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$  практически не уменьшается. Таким образом, было обнаружено, что оптимальными условиями для модельной реакции являются аэробные, 25 °С, вода в качестве растворителя и ультразвуковое облучение частотой 100 кГц мощностью 300 Вт.

Азидные производные хитозана, описанные нами ранее в работе [1], были использованы в качестве азидной компоненты в реакции катализируемого медью(I) 1,3-диполярного циклоприсоединения с пропаргиловым эфиром бетаина в воде при ультразвуковом облучении частотой 100 кГц мощностью 300 Вт. Мольное соотношение азидозамещенных глюкозаминных звеньев хитозана к пропаргиловому эфиру бетаина и к  $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$  составляло 1:1.3:0.05, в реакционную смесь также помещали медную проволоку. В результате были получены триазолбетаиновые производные хитозана (отличающиеся спейсерами А и В) с низкими, средними и высокими степенями замещения, равными степеням замещения исходных азидных производных хитозана.

Полученные соединения представляют интерес в качестве потенциальных фармакологически активных соединений, в которых фармакофором является триазольный цикл.

**Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № Т20Р-375).**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kritchenkov, A. S., et al. Novel non-toxic high efficient antibacterial azido chitosan derivatives with potential application in food coatings. Food Chemistry, 2019. – 301.

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА ПОРОШКА СПЛАВА Ti-18Zr-15Nb, СИНТЕЗИРОВАННОГО ГИДРИДНО-КАЛЬЦИЕВЫМ МЕТОДОМ

Юдин С.Н.<sup>1</sup>, Алимов И.А.<sup>1</sup>, Володько С.С.<sup>1</sup>, Касимцев А.В.<sup>1</sup>, Петрова-Буркина О.А.<sup>2</sup>,  
Рубаник В.В.<sup>2</sup>, Рубаник В.В.мл.<sup>2</sup>, Быша В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО Метсинтез, г. Тула, Россия

metsitez@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь  
ita@vitebsk.by

Развитие имплантологии невозможно представить без разработки новых медицинских сплавов, отличающихся «похожестью» своего механического поведения к костной ткани человека. Также эти сплавы должны отличаться полной нетоксичностью в среде человеческого тела. Перспективным материалом для этого является композиция Ti-18Zr-15Nb, % ат. [1]. Ввиду повышенной химической активности компонентов сплава, их тугоплавкости и разнотности, а также ликвации при кристаллизации слитков имеются существенные трудности в их получении традиционной металлургией (плавление + кристаллизация).

Альтернативный подход, заключающийся в гидридно-кальциевом синтезе сплава Ti-18Zr-15Nb и его консолидации, может позволить изготавливать материал с регулируемым уровнем плотности и требуемым качеством по химическому и фазовому составам.

Медицинские материалы должны обладать высокой усталостной прочностью в условиях знакопеременных нагрузок. Помимо всего прочего это достигается повышением качества сплавов по неметаллическим включениям. Настоящий порошковый сплав после гидридно-кальциевого синтеза содержал около 0,45 % масс примеси кальция. Очевидно, что основная форма присутствия кальция – это CaO, т.к. этот щелочноземельный металл отличается очень высоким сродством к кислороду.

На остаточное содержание кальция в гидридно-кальциевых порошках сильное влияние оказывает их сложная морфология, т.к. в условиях гидрометаллургической обработки продуктов синтеза (порошок сплава + CaO) не всегда имеются благоприятные условия для полного взаимодействия воды или водного раствора HCl с CaO. Частицы CaO могут быть как бы «запечатаны» внутри крупных частиц искомого сплава, например, Ti-18Zr-15Nb. На рисунке 1 показана морфология частиц порошка Ti-18Zr-15Nb.

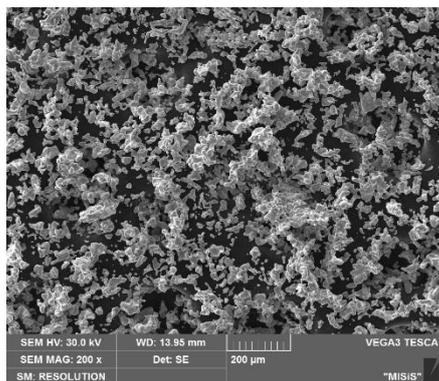


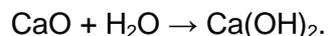
Рисунок 1 – Морфология частиц гидридно-кальциевого порошка Ti-18Zr-15Nb

Из рисунка видно, что действительно порошок Ti-18Zr-15Nb имеет очень сложное губчатое строение со множеством мелких пор (полостей), в которые вода из-за поверхностного натяжения может не проникать, тем самым сохраняя определённый уровень остаточного кальция в форме CaO.

Одним из подходов к дальнейшему снижению кальция в порошках является их ультразвуковая обработка (УЗО). В настоящей работе УЗО осуществляли на установке УЗДН-21 с помощью погружного волновода в кавитационном режиме на частотах 22 и

44 кГц в течение 5, 10 и 30 мин с предварительным нагревом смеси до 100 °С и без нагрева. Также обработка ультразвуком проводилась под избыточным гидростатическим давлением на частоте 18 кГц в течение 5, 10 и 30 мин. Навеска порошка для каждого режима УЗО составляла 20 г. Объем дистиллированной воды 200 мл.

Очевидно, что УЗО должна интенсифицировать процесс гашения оксида кальция по реакции:



Эффективность такой обработки можно контролировать по росту щелочности водной среды ( $\text{pH} > 7$ ).

В настоящей работе установлено, что УЗО порошка Ti-18Zr-15Nb, содержащего 0,45 % масс Ca, приводит к приросту pH на 2–3 единицы. Предварительный нагрев смеси до 100 °С ускоряет процесс взаимодействия CaO с водой за более короткое время. Максимальное значение pH наблюдаются при обработке на частоте 22 кГц в течение 30 минут с предварительным нагревом смеси до 100 °С.

В условиях ультразвуковой обработки порошка низкомодульного сплава Ti-18Zr-15Nb, содержащего 0,45 % масс Ca, наблюдается рост pH среды в сторону щелочи, что обусловлено взаимодействием дистиллированной воды с CaO с образованием сильной щёлочи Ca(OH)<sub>2</sub>. Дальнейшая кислотная обработка водным раствором HCl позволит вымыть Ca(OH)<sub>2</sub> из порошка сплава. Таким образом, УЗО является действенным средством дополнительного понижения концентрации примеси Ca в порошках, синтезируемых гидридно-кальциевым методом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Конопацкий, А. С., Дубинский, С. М., Жукова, Ю. С., Инаеян, К., Браиловский, В., Прокошкин, С. Д., Филонов, М. Р. Экспериментальный поиск химических составов сверхупругих титановых сплавов с повышенными функциональными свойствами // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2019. – № 6. – С. 3–9.

## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МУЛЬТИФЕРРОИКАХ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТ-ТИТАНАТ СВИНЦА И ФЕРРИТА НИКЕЛЯ**

**Рубаник В.В., Лалетин В.М., Поддубная Н.Н.**

*ГНУ «Институт технической акустики» НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь  
e-mail: poddubnaya.n@rambler.ru*

### **Введение**

Мультиферроики – это вещества, обладающие одновременно магнитным и электрическим упорядочением. В природных мультиферроиках это упорядочение связано с определённой симметрией решетки. В композиционных мультиферроиках взаимосвязь между магнитной и электрической подсистемами достигается за счет передачи механической деформации между магнитострикционной и пьезоэлектрической составляющими. При этом компоненты могут быть равномерно распределены по объему образца (объемные композиты), либо чередоваться (слоистые композиты). В объемных композитах механический контакт между фазами возникает в процессе спекания. Поэтому величина магнитоэлектрического (МЭ) взаимодействия зависит не только от состава порошков и их соотношения, но и температуры спекания, модифицирующих добавок, гранулометрического состава. В настоящее время одним из способов, применяемых для интенсификации процесса спекания, является ультразвуковая обработка шихты перед прессованием и синтезом. В результате многократного воздействия на поверхность частиц порошка импульсных нагрузок, сопровождающих замыкание кавитационных пузырьков, и соударения частиц порошка, возникающего при их беспорядочном движении под действием ультразвука, происходит диспергирование порошка [1]. За счет возникновения в частицах дефектной структуры достигается активация порошков, что позволяет говорить об ультразвуковой механоактивации. Рентгенофазовые исследования показали, что ультразвуковая механоактивация также стимулирует полиморфные превращения и приводит к возникновению модификаций кристаллической структуры порошков. Аналогичного эффекта можно добиться путем помола порошков в шаровой мельнице от нескольких часов до нескольких суток [2, 3]. Целью настоящей работы является исследование влияния ультразвуковой механоактивации на величину МЭ взаимодействия в объемных композитах, определяемую МЭ коэффициентом по напряжению.

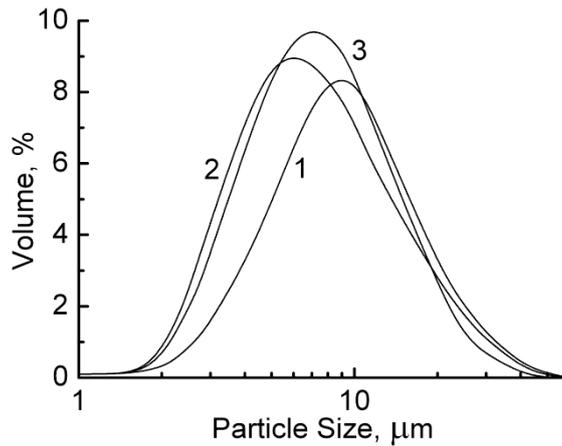
Ниже представлены результаты измерения МЭ коэффициента объемных композиционных мультиферроиков на основе пьезокерамики цирконат-титанат свинца марки ЦТС 23 (ЦТС), имеющей хорошие диэлектрические и пьезоэлектрические свойства, и модифицированного феррита никеля  $\text{NiFe}_{1,9}\text{Co}_{0,02}\text{O}_4$  (NFO) (с высоким удельным сопротивлением  $\sim 10^{10}$  Ом см при комнатной температуре) в соотношении 50 : 50 масс. %.

Образцы готовили по следующей технологии. На первой стадии взвешенные порошки подвергались мокрому помолу в течение 60 минут (режим 1). Полученный порошок обрабатывали ультразвуком при нормальном атмосферном давлении (режим 2) и при давлении 0,2 МПа (режим 3). В качестве источника УЗК использован ультразвуковой генератор УЗГ 1-1 с частотой колебаний 18 кГц и магнитострикционный преобразователь ПМС 1-1. Затем порошки формовали при статическом давлении 200 МПа и спекали в свинецсодержащей засыпке в течение двух часов при температурах 1180, 1200, 1220, 1240 °С. Скорость охлаждения не превышала 30 °С/час. Поляризацию материалов осуществляли при температуре 80 °С в течение четырех часов в электрическом поле 4 кВ/мм, возрастающем при охлаждении до 5 кВ/мм. Все образцы имели форму диска диаметром 9 мм и толщиной 1 мм.

Для исследования МЭ эффекта использовали метод, основанный на измерении напряжения, возникающего на образце при наложении на него переменного и медленно меняющегося магнитных полей. Амплитуда переменного магнитного поля составляла 80 А/м на частоте 1 кГц. МЭ коэффициент по напряжению ( $\alpha_E$ ) определяли

исходя из толщины образца ( $h$ ), величины напряжения ( $dV$ ) и напряженности переменного магнитного поля ( $dH$ ):  $\alpha_E = dV/(h \cdot dH)$ .

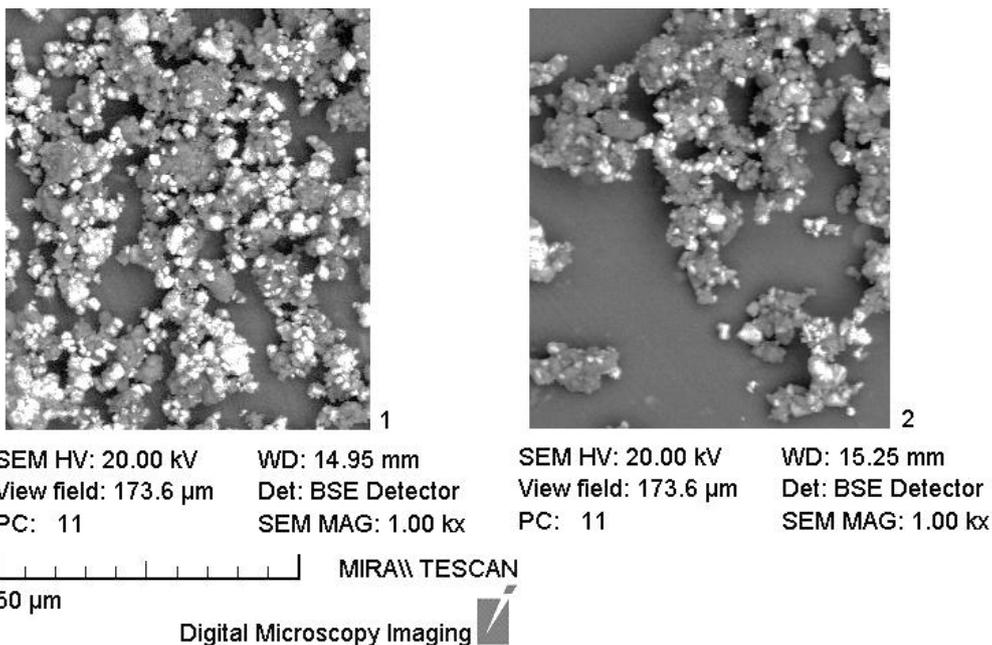
Анализ распределения частиц по гранулометрическому составу порошков показал, что ультразвуковая обработка порошка приводит к уменьшению среднего размера частиц (рис. 1). Для порошков, подвергнутых ультразвуковому воздействию без давления, доля частиц с меньшим размером зёрен выше, а распределение частиц по размерам несколько шире, чем у порошков, озвученных при дополнительном давлении. Очевидно, что наложение ультразвукового воздействия и давления приводит к увеличению среднего размера зёрен в порошке. Это происходит за счет агрегации частиц с размером менее 5 мкм и роста доли частиц размером от 5 до 10 мкм в общем объеме частиц порошка. При этом снижается доля частиц размером свыше 25 мкм.



1 – режим 1, 2 – режим 2, 3 – режим 3

Рисунок 1 – Анализ распределения частиц по гранулометрическому составу порошков после ультразвуковой обработки

Как видно из приведенных на рисунке 2 снимков микроструктуры, распределение фаз в составе порошка после ультразвуковой обработки становится более равномерным, чем до неё. При этом наблюдается увеличение количества зёрен меньших размеров в общем объёме порошков. Тёмные области на снимках отвечают за ферромагнитную фазу, светлые – за пьезоэлектрическую.



1 – режим 1, 2 – режим 2, 3 – режим;

Рисунок 2 – Фотографии микроструктуры шихты, использованной для изготовления композиционных материалов при различных режимах ультразвуковой обработки

Исследование влияния температуры спекания и режимов обработки на МЭ коэффициент (рис. 3) показало, что с увеличением температуры спекания от 1180 до 1220 °С наблюдается рост МЭ сигнала. МЭ коэффициент имеет максимальную величину при температуре спекания 1220 °С, и уменьшается с дальнейшим увеличением температуры. Такая закономерность свойственна всем исследованным образцам.

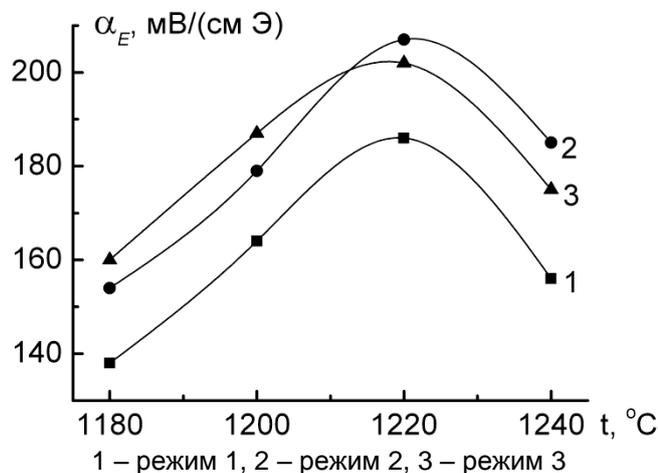


Рисунок 3 – зависимость МЭ коэффициента от температуры спекания керамики

Композиты, полученные по обычной керамической технологии, имеют МЭ коэффициент равный 185 мВ/(см Э). Максимальный МЭ коэффициент, достигающий 207 мВ/(см Э), получен на образцах, изготовленных из активированного ультразвуком при атмосферном давлении порошка. Образцы, полученные из озвученного под давлением порошка, имеют значения МЭ коэффициента равные 202 мВ/(см Э). Выше мы показали, что ультразвуковая механоактивация привела к увеличению количества зерен меньших размеров в общем объеме порошков. При этом наблюдается более равномерное распределение фаз в составе порошка. Однородная форма частиц и увеличение количества зерен меньших размеров позволяет существенно уменьшить дефектность микроструктуры керамики за счет лучшей текучести порошка и, как следствие, качества упаковки частиц в процессе прессования [8]. Этот факт позволяет утверждать, что ультразвуковая механоактивация порошка приводит к улучшению структуры синтезированной керамики, вследствие чего наблюдается рост МЭ коэффициента. Смещение кривой 3 в сторону меньших температур по сравнению с кривой 2, по-видимому, связано с особенностями влияния температуры спекания на МЭ эффект в объемных композитах. Процесс спекания сопровождается не только увеличением плотности керамики, но и перекрестным легированием исходных фаз. В первом случае, увеличение плотности приводит к росту МЭ коэффициента, во втором – к его уменьшению. Действие этих двух механизмов обуславливает существование своей оптимальной температуры спекания композиционного материала.

В основе полученных закономерностей лежит ультразвуковая обработка шихты. Она приводит к измельчению исходных компонентов, улучшению дисперсного состава шихты и более равномерному распределению порошков пьезоэлектрика и феррита, что сопровождается увеличением площади соприкосновения двух фаз.

Применение ультразвуковой механоактивации порошков позволяет увеличить величину МЭ отклика объемных композитов до 15 %. Это обусловлено получением более гомогенного по своему составу композиционного материала и увеличением площади соприкосновения между фазами.

#### Благодарности

**Работа выполнена при поддержке проекта TUMOCs. Этот проект получил финансирование от исследовательской и инновационной программы Horizon 2020 Европейского Союза в рамках грантового соглашения Марии Склодовской-Кюри № 645660.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасанов, О. Л. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов: учебное пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, В. В. Полисадова, А. П. Зыкова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 28.
2. Близнюк, Л. А. Влияние ультразвуковой механоактивации на фазообразование в диэлектрическом керамическом материале на основе соединения  $BaAl_2Si_2O_8$  / Л. А. Близнюк, Т. П. Петроченко, В. И. Каско, В. В. Рубаник, А. Д. Шилин, В. В. Рубаник мл. // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии». 29 мая – 1 июня 2013. – Витебск, Беларусь: сборник статей / УО ВГТУ. – Витебск, 2013. – С. 136–138.
3. Salak, A. N. Metastable perovskite  $Bi_{1-x}La_xFe_{0.5}Sc_{0.5}O_3$  phases in the range of the compositional crossover / A. N. Salak, D. D. Khalyavin, I. Zamaraite, A. Stanulis, A. Kareiva, A. D. Shilin, V. V. Rubanik, Yu. V. Radyush, A. V. Pushkarev, N. M. Olekhovich, M. Starykevich, R. Grigalaitis, M. Ivanov & J. Banys // Phase Transitions, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/01411594.2017.1290802>.
4. Lin, J., Duh, J. Coprecipitation and hydrothermal synthesis of ultrafine 5.5 mol.%  $CeO_2$ –mol%  $YO_{1.5}$ –  $ZrO_2$  powders // J. Amer. Ceram. Soc. – 1997. – V. 80, № 1. – P. 92–98.

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАДАНИЕ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Симова С.Н.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.мл.<sup>1</sup>, Дородейко В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь  
ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>ЗАО «Медицинское предприятие Сатурн», г. Витебск, Беларусь

При проведении исследований использовали образцы сплава Ti-50,4 ат.% Ni диаметром 0,65 мм после рекристаллизационного отжига при температуре 700 °С в течение 30 минут с последующей закалкой, в которых прямое и обратное фазовые превращения реализовывались по схеме B2 ↔ B19', а характеристические температуры, измеренные методами дифференциальной сканирующей калориметрии, составляли:  $M_n = 30$  °С,  $M_k = 14$  °С,  $A_n = 41$  °С,  $A_k = 57$  °С. Перед проведением исследований материал охлаждали до 0 °С, чтобы при комнатных температурах он находился в мартенситной фазе и, соответственно, деформация и обработка сплава осуществлялась в мартенситном состоянии.

В жёстко зафиксированном на конце разрезного титанового волновода полуволновой длины в деформированном состоянии образце возбуждали ультразвуковые колебания (УЗК) частотой 22 кГц и различной интенсивности при температурах  $\sim 20 \pm 3$  °С в течение  $\sim 1$  мин. В процессе ультразвукового воздействия при помощи тепловизионной камеры наблюдали изменение температуры на поверхности образца.

Анализ результатов тепловизионных исследований показал, что в течение первых 10 ÷ 15 секунд после включения ультразвука наблюдается резкий рост температуры образца (рис. 1), причём наиболее интенсивно увеличивается температура в точках с наибольшей деформацией. Достигнув некоторого максимального значения ( $\sim 65 \div 72$  °С), которое слабо зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний, температура уменьшается до  $\sim 50\text{--}55$  °С и далее остаётся практически на том же уровне до момента выключения ультразвука.

Видно, что увеличение температуры осуществляется в два этапа: в первые 2–3 секунды она возрастает до  $\sim 40$  °С, а затем скорость нагрева уменьшается, о чем свидетельствует уменьшение наклона кривой зависимости температуры от длительности ультразвуковой обработки (УЗО). Для исследуемого TiNi сплава температуры обратного мартенситного превращения, определенные методами ДСК, составляют  $A_n = 41$  °С и

$A_k = 57$  °С, т.е. первый этап соответствует нагреву мартенситной фазы, а второй – реализации обратного мартенситного превращения в образце.

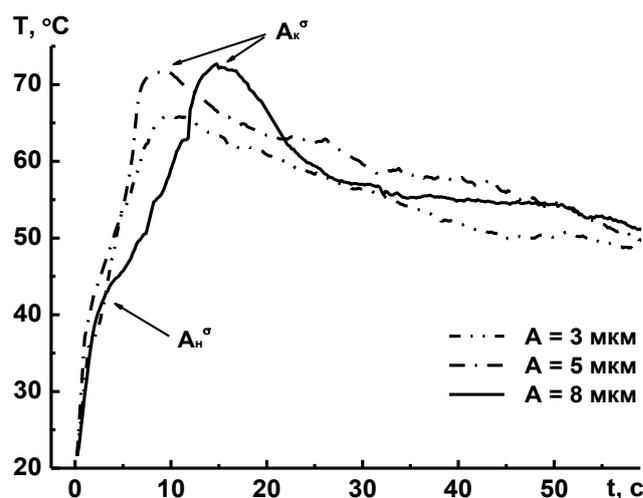


Рисунок 1 – Зависимости максимальной температуры деформированного образца от длительности УЗО различной интенсивности

Процесс нагрева образцов за счёт поглощения энергии УЗК продолжается до перехода никелида титана (полностью или частично) в аустенитное состояние, в котором его внутреннее трение ниже по сравнению с мартенситным и двухфазным, вследствие чего дальнейшего нагрева не происходит. Однако максимальная температура образца в процессе УЗО составляла  $\sim 65 \div 72$  °С, что на  $\sim 8\text{--}15$  °С выше температуры  $A_c$ . Это может быть обусловлено тем, что образец находится в деформированном и напряженном состоянии, в результате чего характеристические температуры его обратного превращения в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона должны превышать аналогичные температуры в ненапряженном материале.

Далее все образцы охлаждали до температуры  $\sim 0$  °С (ниже  $M_s$ ), переводя в мартенситную фазу, а затем нагревали в свободном состоянии до температур  $\sim 100 \pm 5$  °С и определяли величину восстанавливаемой деформации  $\epsilon_{\text{пф}}$ . Аналогичную последовательность действий осуществляли для контрольного образца, пропуская этап ультразвуковой обработки.

Установлено, что при увеличении наводимой в мартенсите деформации значения восстанавливаемой после ультразвуковой обработки деформации увеличиваются почти линейно, как и в контрольном образце, однако при превышении  $\sim 10\%$  становятся ниже (рис. 2). Вероятно, это обусловлено большей пластической деформацией мартенсита и в связи с этим более значительным влиянием ультразвука в этом случае, так как его воздействие аккумулируется, главным образом, именно на дефектах кристаллической решетки.

При наведении в образцах деформации  $\sim 8,3\%$ , упругого возврата до  $\sim 6,3\%$ , и последующей ультразвуковой обработке обнаружено, что эффект памяти формы в них составлял:  $\sim 4,2\%$  для  $A \approx 3$  мкм,  $\sim 3,9\%$  для  $A \approx 5$  мкм и  $\sim 2,1\%$  для  $A \approx 8$  мкм, в то время как в контрольном образце  $\epsilon_{\text{пф}} \approx 4,6\%$ , т.е. величина запоминаемой в процессе УЗО деформации составила  $\sim 33\%$ ,  $\sim 38\%$  и  $\sim 67\%$  соответственно.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в результате УЗО деформированного и заневолненного TiNi сплава восстанавливаемая им при нагреве деформация может уменьшаться до  $\sim 33\%$  от наведенной, т.е. запоминаемая деформация составляет до  $\sim 67\%$ .

Такое частичное «запоминание» деформации, наведенной в мартенсите, в процессе ультразвуковой обработки заневолненных образцов похоже на результаты, полученные после термообработки при температурах  $100 \div 250$  °С [1], что приводит к предположению об общих причинах запоминания деформации при таких низких температурах воздействия.

Исследование динамики восстановления деформации в первом цикле нагрева после УЗО показало, что ультразвуковое воздействие приводит к расширению температурного интервала формовосстановления и изменению характеристических температур в зависимости от интенсивности ультразвукового воздействия (рис. 3 а). В

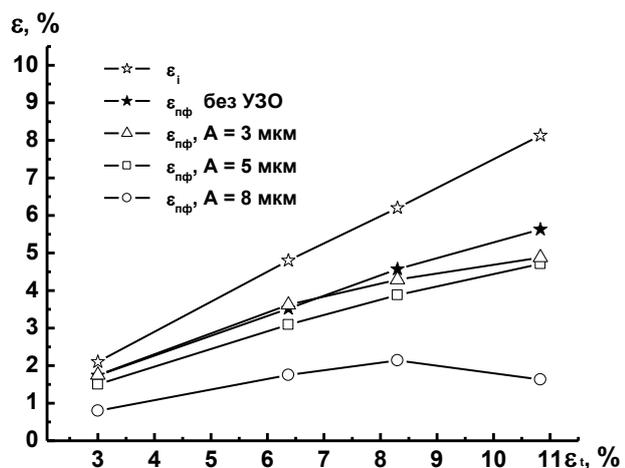


Рисунок 2 — Зависимости восстанавливаемой деформации от наводимой после УЗО различной интенсивности

образцах после УЗО восстановление деформации осуществляется в две стадии: первая начинается при температуре  $\sim 45$  °С, а температурный интервал реализации второй стадии с увеличением амплитуды УЗК сдвигается в сторону повышения температур и составляет:  $\sim 58 \div 69$  °С для амплитуды  $A \approx 3$  мкм,  $\sim 62 \div 82$  °С для  $A \approx 5$  мкм и  $\sim 79 \div 100$  °С для  $A \approx 8$  мкм, — в то время как в образцах, не подвергнутых УЗО, возврат деформации протекает одностадийно в температурном диапазоне  $\sim 61 \div 74$  °С. Первую стадию можно объяснить процессами раздвоивания мартенсита и возвратного движения дислокаций, обусловленными последствиями ультразвукового воздействия. Особенности протекания второй стадии свидетельствуют о том, что возврат деформации в данном случае осуществляется непосредственно в процессе реализации перехода мартенсит  $\rightarrow$  аустенит. Результаты дальнейших исследований показали, что при увеличении наводимой деформации значение запоминаемой деформации также увеличивается, однако во всех случаях составляет  $\sim 67$  % от наведенной деформации.

Анализ диаграмм деформирования образцов в мартенситной фазе после УЗО свидетельствует об уменьшении фазового предела текучести  $\sigma_M$  с увеличением интенсивности УЗК, — так, в образцах после УЗО с  $A \approx 8$  мкм

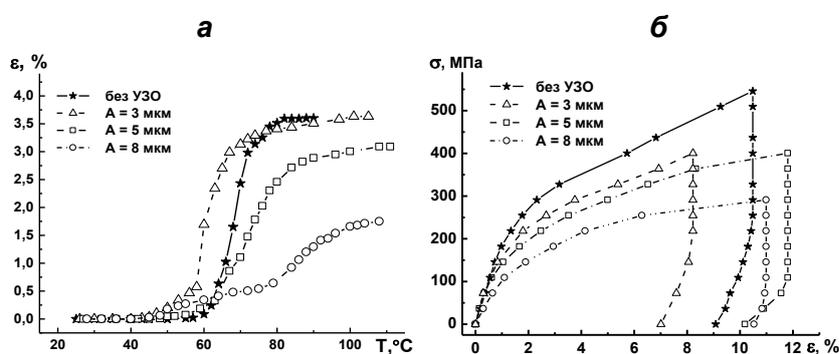


Рисунок 3 – Зависимости восстанавливаемой деформации от температуры (а) и диаграммы деформирования (б) образцов после УЗО различной интенсивности

$\sigma_M \approx 120$  МПа, а после обработки с  $A \approx 5$  мкм  $\sigma_M \approx 150$  МПа, в то время как в не обработанных образцах  $\sigma_M \approx 210$  МПа (рис. 3 б).

Такое снижение фазового предела текучести должно способствовать увеличению ресурса обратимой деформации при реализации эффекта памяти формы, — и действительно, в образцах после УЗО при последующем деформировании и нагревании через интервал обратного мартенситного превращения формовосстановление больше (на  $\sim 20$  %), чем в необработанных образцах.

На основании обобщения экспериментальных данных и анализа полученных зависимостей запоминаемой деформации в процессе УЗО и ТО при температурах  $100 \div 250$  °С предложен механизм запоминания деформации при низкотемпературной обработке, заключающийся в реализации обратного мартенситного превращения в деформированном и заневоленном материале и связанной с ней частичной релаксацией внутренних напряжений, в результате чего часть деформации, наведенной в мартенситной фазе, переходит в пластическую деформацию аустенитной фазы.

На основании полученных результатов предложен новый низкотемпературный способ задания памяти формы TiNi сплавам с использованием ультразвуковых колебаний, главными преимуществами которого является кратковременность обработки (в случае тонких проволочных образцов в течение  $\sim 1$  мин), реализация при комнатных температурах и нагрев материала до температур, превышающих  $A_K$  ненапряженного материала всего на  $\sim 15$  °С [2]. Столь малый разогрев материала при задании памяти формы не имеет аналогов, и это преимущество трудно переоценить, так как появляется возможность обрабатывать композиционные конструкции из

сплавов TiNi, помещенных в полимерную оболочку, которая не выдерживает даже таких низких температур, которые были предложены выше.

Таким образом, в процессе проведения исследований по влиянию ультразвуковой обработки сплава TiNi на восстанавливаемую деформацию установлено, что, в случае, когда обработке подвергается заневоленный материал подвергшийся деформированию в мартенситной фазе, обеспечивается частичное «запоминание» сообщенной ему деформации, при этом значения запоминаемых деформаций зависят от интенсивности и длительности ультразвукового воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние условий деформирования и низкотемпературной обработки на задание памяти формы в никелиде титана / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., С. Н. Милюкина, В. Г. Дородейко // 50-й Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности», 27 сентября – 1 октября 2010 г., Витебск, Беларусь: сборник материалов: в 2 ч. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2010. – Ч. 2. – С. 209–212.

2. Способ задания памяти формы изделиям из сплава TiNi: евраз. пат. 035010: МПК С22/F1/00, С22/F1/10, С21D1/04, С22/F3/00(2006.01) / В. В. Рубаник, В. В. Рубаник мл., С. Н. Милюкина; дата публ. 16.04.2020.

## **ПОЛУЧЕНИЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ МЕТОДОМ СВС И НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

**Рубаник В.В.мл.<sup>1</sup>, Реснина Н.Н.<sup>2</sup>, Кулак М.М.<sup>1</sup>, Быша В.В.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.<sup>1</sup>,  
Беляев С.П.<sup>2</sup>, Колодинская Н.С.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа,  
Минск, Беларусь*

Открытие самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) (диплом на открытие № 287) А.Г. Мержановым, И.П. Боровинской и В.М. Шкиро привело к развитию нового научного направления в области химической физики – структурной макрокинетики СВС-процессов, важнейшим направлением которой является поиск эффективных путей управления процессом с целью получения материалов и изделий с заданным фазовым составом, структурой и свойствами. Использование традиционных методов, предусматривающих регулирование процесса СВС путем изменения внешнего давления, начальной температуры, параметров смеси, ограничено. Для СВС характерны неравновесные механизмы фазо- и структурообразования продукта [1]. А для системы, находящейся в неравновесном состоянии, даже слабое внешнее воздействие может существенно изменить ее состояние.

Пористые материалы с памятью формы на основе TiNi привлекают внимание в связи с их перспективным применением в качестве костных имплантатов [2]. Однако структура пористых образцов TiNi сложна и сильно зависит как от параметров СВС, так и химического состава смеси порошков [3]. Вопрос о влиянии давления инертного газа на пористую структуру и ультразвуковых колебаний во время синтеза на свойства синтезированного материала ранее не рассматривался. В то же время одной из возможных причин образования сложной пористой структуры при СВС является наличие газов как растворенных в исходных порошках Ti, Ni и выделяющихся при горении, так и давление инертного газа в реакторе СВС. Их совместное действие может влиять как на пористую структуру, так и свойства образцов. Поэтому целью данной работы было исследование структуры пористого TiNi, полученного методом СВС, при различном давлении аргона и наложении ультразвуковых колебаний на установке для синтеза материалов методом СВС.

Исходные порошки титана и никеля марок ПТОМ-2 и ПНК-1Л5 предварительно не менее 10 часов сушили в термостатированном шкафу при температуре 100 °С. Смешивание порошков в стехиометрическом соотношении Ti-50.0 ат. % Ni осуществлялось в керамической ступке с последующим перемешиванием в смесителе собственной конструкции в течение 8 часов. Затем смесь помещалась в кварцевую трубку с внутренним диаметром 30 мм и устанавливалась в реактор, который заполняли аргоном. Смесь нагревали до 350 °С. Температуру в печи контролировали хромель-алюмелевой термопарой. После достижения заданной температуры в печи, образец для выравнивания температурного поля выдерживали в течение 1 часа и инициировали процесс СВС нагретой вольфрамовой проволокой. Давление в реакционном сосуде изменяли от атмосферного до 5 атм. Во время синтеза измеряли максимальную температуру волны горения. Для этого использовали хромель-алюмелевую термопару диаметром 0,2 мм, которую помещали в середину образца.

После реакции образец медленно охлаждали в реакторе в атмосфере аргона. Была проведена серия синтеза образцов с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) во время горения.

Из синтезированного материала на электроэрозионном станке вырезали образцы для дальнейших исследований.

Пористую структуру продольных срезов исследовали с помощью светового микроскопа ЛОМО-200, оснащенного цифровой камерой. Изображения были

проанализированы с помощью программного обеспечения Image SP и определена пористость.

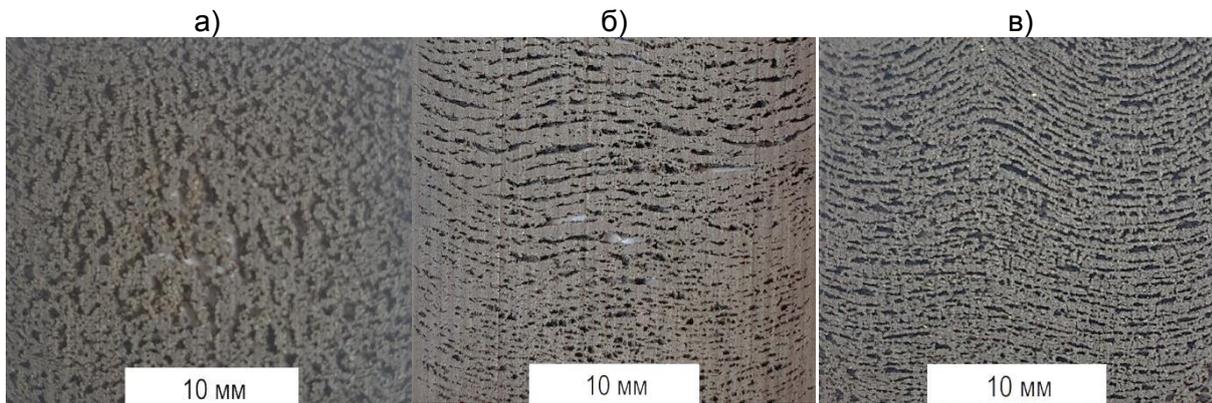


Рисунок 1 – Микроструктура образцов пористого никелида титана, полученных при давлениях в реакционном сосуде 1 атм (а, в); 5 атм (б) и ультразвуковом воздействии амплитудой 25 мкм

Анализ микроструктуры образцов (рис. 1) позволяет сделать вывод, что изменение давления при котором происходит синтез, приводит к изменению распределения пористости и режима горения от автоколебательного к стационарному, что можно объяснить увеличением теплоотдачи с образца в среду аргона за счет увеличения коэффициента теплоотдачи. Наложение ультразвуковых колебаний во время синтеза приводит к увеличению частоты автоколебаний процесса синтеза.

Таким образом, изменяя давление аргона во время СВС, можно успешно осуществлять регулирование пористой структуры TiNi.

**Работа поддержана совместным проектом РФФИ и БРФФИ (РФФИ № 20-58-00025, БРФФИ № Т20Р-377).**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов, А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник; под ред. акад. Я. М. Колотыркина. – М.: Химия, 1983. – С. 6–44.
2. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В. Э. Гюнтер [и др.]. – Томск: МНЦ, 2006. – 296 с.
3. Resnina, N. Influence of chemical composition and pre-heating temperature on the structure and martensitic transformation in porous TiNi-based shape memory alloys, produced by self-propagating high-temperature synthesis / N. Resnina, S. Belayev, A.Voronkov // Intermetallics. – 2013. – V. 32. – P. 81–89.

## МНОГОЦЕЛЕВОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГЕНЕРАТОР

<sup>1</sup>Круглешов А.А., <sup>2</sup>Казьмин А.А.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», Витебск, Беларусь,  
ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Беларусь

Ультразвуковые технологии, основанные на использовании энергии ультразвуковых колебаний, занимают важное место среди высоких технологий и позволяют интенсифицировать многие технологические процессы. В практике как отечественного, так и зарубежного проектирования под конкретный технологический процесс разрабатывается ультразвуковая колебательная система (УЗКС), которая соответствующим образом согласуется с ультразвуковым генератором, таким образом формируется пара «один генератор – один инструмент». При этом большое внимание уделяется механическим параметрам УЗКС, таким как геометрические конструктивные особенности, свойства материалов волноводных элементов, коэффициент усиления, резонансная частота и т.п. В «ИТА НАН Беларуси» разработан многоцелевой ультразвуковой генератор «УЗГ 500» (рис. 1), обладающий высокой универсальностью, что позволило использовать его в составе разнообразного ультразвукового оборудования. То есть один и тот же электронный генератор использовали с различными УЗКС для различных технологических процессов: ультразвуковое резание, упрочнение, сварка, диспергирование и др.

Разработанный на базе современной схемотехники ультразвуковой генератор обеспечивает оптимальные режимы работы в широком диапазоне фиксированных частот от 16 до 100 кГц мощностью до 500 Вт [1]. Генератор обеспечивает: цифровой синтез частоты генерации, возможность мгновенной установки любой частоты генерируемых колебаний в рабочем диапазоне генерации с точностью 0,1 Гц, возможность создания частотно-временных профилей генерации, автоматическую подстройку частоты генерации на резонансную частоту преобразователя, автоматическую подстройку импеданса выходного каскада генератора; использование централизованного цифрового управления всеми модулями генератора, позволяющего относительно просто изменять алгоритм работы генератора; управление режимами работы генератора через экранное меню.

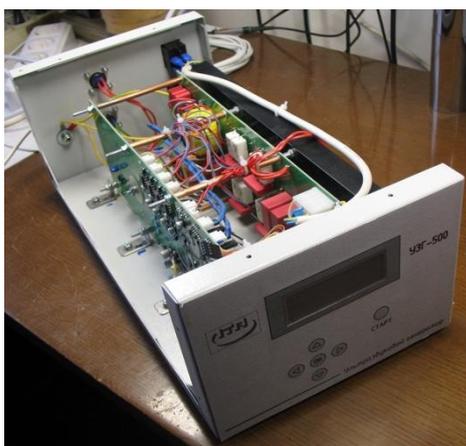


Рисунок 1 – Внешний вид УЗГ 500

На основе данного генератора было создано технологическое оборудование для поверхностного пластического деформирования изделий из алюминиевых и титановых сплавов (технология внедрена на 558-м Авиационно-ремонтном заводе, г. Барановичи), для ультразвуковой резки полотна автомобильных шин, сварки тканевых респираторов медицинских, сварки полимерных сеток (оборудование внедрено на СОО «Белвест», г. Витебск) и др. Таким образом, один и тот же генератор использовался для разных технологических процессов и, естественно, с разными акустическими системами, каждая из которых обладала определенным импедансом и резонансной частотой 40 и 20 кГц. Перестройку генератора под конкретный вид

инструмента осуществляли за счёт изменения частоты, мощности генератора и времени генерации УЗ-колебаний в настройках программного обеспечения.

В связи с развитием современной цифровой схемотехники электрическая часть ультразвуковых генераторов непрерывно совершенствуется [2]. В частности, традиционное использование в генераторах плавких предохранителей, предназначенных для защиты выходных транзисторов при выходе из строя

ультразвуковой колебательной системы или неудовлетворительного согласования её с выходным каскадом генератора, не позволяет надёжно обеспечить работоспособность генератора.

В связи с этим был разработан и включен в функциональную схему генератора электронный предохранитель (рис. 2).

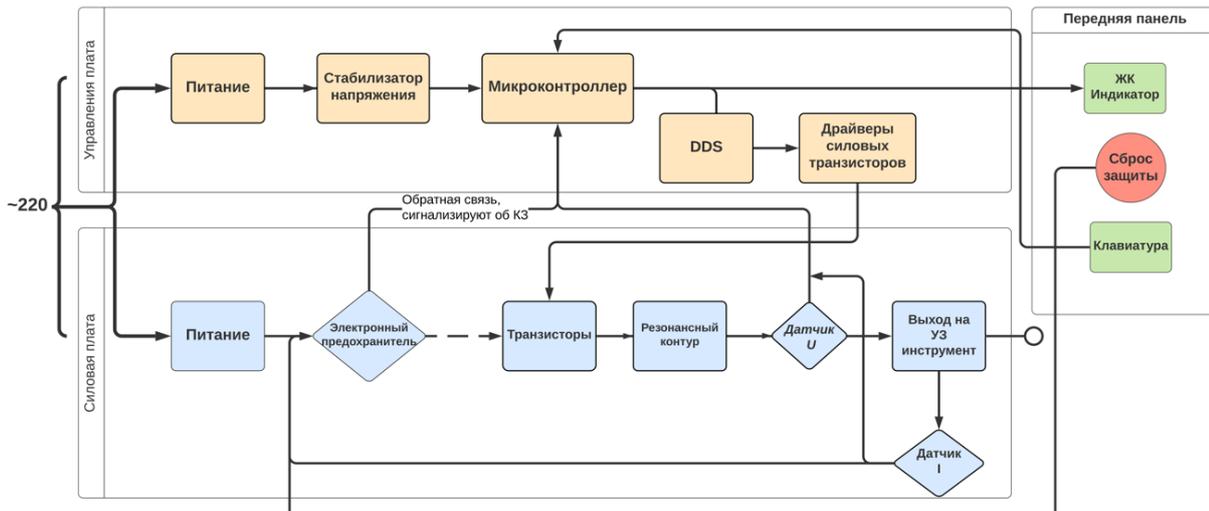


Рисунок 2 – Функциональная схема генератора

Электронный предохранитель состоит из прецизионного токового резистора (шунт), усилителя тока с набором согласованных резисторов, компаратора для формирования сигнала отключения, полевого транзистора для выполнения коммутации нагрузки. Ток нагрузки протекает через шунт, на котором происходит падение напряжения, которое усиливается дифференциальным усилителем тока. Поскольку сопротивление шунтового резистора очень мало и заранее известно, то с помощью аналоговой схемы можно задать пороговое значение тока. Если пороговое значение, заданное элементной базой электронного предохранителя, превышено, то компаратор формирует сигнал, и силовой транзистор отключает нагрузку. Скорость такого отключения во много раз больше, чем для традиционной плавкой вставки, и может составлять нескольких микросекунд.

Разработанный генератор показал выгодную надежность и может быть рекомендован для интенсификации различных технологических процессов в промышленных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубаник, В. В., Басов, Ю. А., Луцко, В. Ф., Кравченя, А. Д., Линевич, А. Д., Круглешов, А. А.; Казьмин, А. А. Многоцелевой ультразвуковой генератор // Машиностроение и металлообработка: материалы межд. науч.-практ. конф. Могилев – Бобруйск, 10-11 октября 2019 года; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 54–56.
2. Хмелёв, В. Н., Барсуков, Р. В., Ильченко, Е. В. Пути совершенствования электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов // Науч.-техн. Вестник Поволжья № 3. – Технические науки. – 2014. – С. 247–253.

## ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

Луцко В.Ф.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Лабецкий В.С.<sup>1</sup>, Кимстач О.В.<sup>1</sup>, Казьмин А.А.<sup>2</sup>,  
Попова О.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь,  
ita@vitebsk.by*

<sup>2</sup>*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь*

### **Введение**

Растущая потребность промышленности и транспорта в материалах, сочетающих в себе высокую прочность и пластичность металла с химической стойкостью и легким весом полимера, привели к необходимости создания многокомпонентных конструкций, в которых металлические и полимерные материалы соединены в гибридную структуру [1]. При этом соединения являются наиболее вероятным источником преждевременного выхода из строя гибридных конструкций. В связи с этим, для сохранения целостности, следовательно, и работоспособности таких конструкций основополагающее значение имеет технология соединения, с помощью которой достигается необходимая прочность соединения между полимером и металлом [2].

Из известных методов сварки для создания гибридных конструкций наиболее перспективной является ультразвуковая сварка. Она характеризуется низким энергопотреблением, коротким временем сварки, простотой автоматизации и экологической безопасностью [3]. Плавление материала пластмассы при ультразвуковой сварке происходит при значительно более низких температурах, чем в процессах тепловой или лазерной сварки [4,5]. Указанные преимущества ультразвуковой сварки перед другими методами соединения дают широкие возможности для интеграции этой технологии в разнообразные производственные процессы, связанные с созданием гибридных конструкций [6].

Примером такой интеграции может служить разработанная в ИТА НАН Беларуси базовая технология сварки ультразвуком с использованием термопластичного полимерного материала в качестве клеевого расплава.

**Целью работы** являлась разработка технологии соединения многокомпонентных металлополимерных структур фильтрующего элемента масляного фильтра методом ультразвуковой сварки. Фильтрующий элемент представляет собой комбинацию: металлическая сетка – полимерный композит – металлическая сетка – термопласт – металлическая сетка – полимерный композит – металлическая сетка.

Для исследования эффективности разработанной технологии был выбран процесс сборки фильтрующего элемента, широко применяемого в масляных и топливных фильтрах двигателей внутреннего сгорания (рис. 1 а). Фильтрующий элемент имеет звездообразную складчатую конструкцию, состоящую из двух опорных стальных сеток 1 и расположенной внутри их фильтровальной бумаги 2 толщиной 0,8 мм (рис. 1 б). Сетки, сотканые из проволоки диаметром 0,2 мм с размером ячейки 1,5x1,5 мм, осуществляют поддержку складок и фиксируют расстояние между ними, а также защищают фильтровальную бумагу от внешних повреждений. Фильтровальная бумага является композиционным материалом, имеет множество мелких пор и представляет собой матрицу из натуральных и синтетических волокон, пропитанных полимерной смолой.

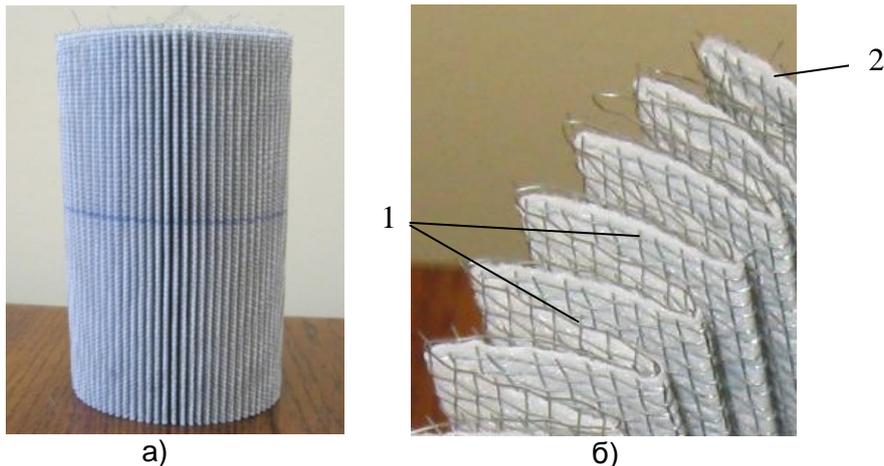


Рисунок 1 – Общий вид (а) и увеличенный фрагмент (б) фильтрующего элемента:  
1 – опорные сетки, 2 – фильтровальная бумага

Основным этапом процесса производства фильтроэлемента является соединение концевых складок шторы. Соединение должно быть герметичным и не должно загрязнять проходящую через фильтр жидкость. Соединение двух концевых секций фильтровального элемента производили на установке для УЗ сварки термопластов [7] мощностью 1,2 кВт с рабочей частотой 20 кГц по схемам, представленным на рис. 2. В качестве связующего материала использовалась вставка из ПВХ в виде полосы 100x3x0,5 мм. Сила прижима составляла 790 Н и поддерживалась постоянной во время всего сварочного цикла и в течение 1 с после выключения ультразвука. Для прочностных испытаний растяжением из концевых секций вырезались образцы шириной 32 мм и длиной 40 мм. Прочность на отрыв полученных соединений при одноосном растяжении определяли по ГОСТ 11262-2017 на разрывной машине ИП 5158–5 при скорости нагружения 20 мм/мин.

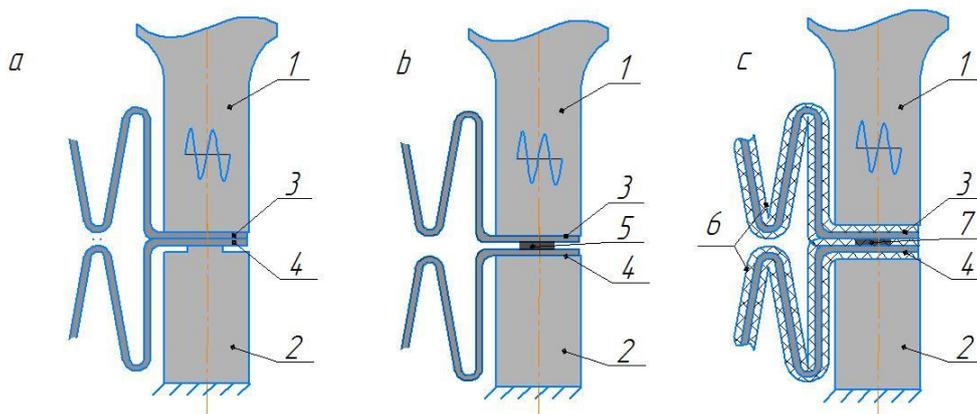


Рисунок 2 – Схемы соединения концевых секций фильтрующего элемента ультразвуковой сваркой: а – композит – композит; б – композит – термопласт – композит; с – металлическая сетка – композит – металлическая сетка – термопласт – металлическая сетка – композит – металлическая сетка; 1 – излучатель, 2 – ложемент, 3, 4 – концевые секции фильтровальной бумаги, 5 – вставка из ПВХ, 6 – опорные стальные сетки, 7 – гибридное соединение (сварной шов)

Результаты измерения разрывной нагрузки на отрыв при растяжении  $F_{pp}$  образцов, полученных ультразвуковой сваркой, в зависимости от времени генерации ультразвуковых колебаний при постоянном статическом давлении  $P_{ст} = 4$  МПа и амплитуде колебаний 50 мкм, представлены на рисунке 3. Кривые 1,2 и 3 соответствуют ультразвуковой сварке по схемам а, б и с, представленным на рисунке 2. Все кривые имеют четко выраженный максимум, соответствующий оптимальному

режиму. Общим для всех трех схем соединения является то, что с возрастанием времени генерации колебаний до оптимального значения увеличивается количество энергии, рассеиваемой в зоне сварки, что приводит к росту объема термопластичного материала, участвующего в процессе плавления и формировании сварного шва. В результате растет прочность соединения. Оптимальное время сварки образцов по схеме *a* составляет 0,7 секунды, по схеме *b* оно равно 1 секунде и по схеме *c* равно 1,7 секунды. Этим временам соответствуют значения максимальной нагрузки на отрыв  $F_{pp}$  образцов 22 Н, 65 Н и 140 Н, соответственно.

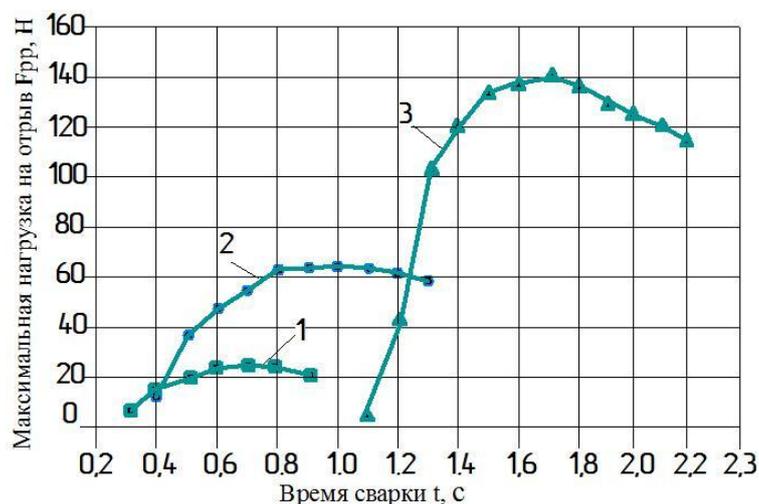


Рисунок 3 – Зависимость разрывной нагрузки при растяжении  $F_{pp}$  от времени сварки образцов, полученных сварным соединением:

1 – по схеме, рис. 2 а; 2 – по схеме, рис. 2 б; 3 – по схеме рис. 2 с

Образцы с гибридной структурой соединения (металлическая сетка – композит – металлическая сетка – термопласт – металлическая сетка – композит – металлическая сетка), полученные по схеме *c* (кривая 3, рис. 3) имеют максимальную нагрузку на отрыв в 6 и 3 раза большую, чем аналогичные значения образцов, сваренных соответственно по схемам *a* (кривая 1, рис. 3) и *b*. (кривая 2, рис. 3). Поверхность разрушения (разрыва) гибридного соединения указывает на то, что в процессе сварки под воздействием ультразвуковых колебаний, металлическая сетка вдавливается в термопластичную вставку. При этом термопласт, как менее жесткий материал по отношению к металлу, испытывает значительно большие деформации, в результате этого происходит его преимущественный нагрев и плавление. В результате металлическая сетка и композит внедряются в расплав, а после его затвердевания образуют прочное гибридное соединение. Очевидно, что из-за более высокой прочности металлической сетки при растяжении на отрыв происходит разрушение самого сварного шва. Этим объясняется высокая прочность гибридного соединения, полученного по схеме *c*. Значительное увеличение оптимального времени сварки по схеме *c* по отношению к схемам *a* и *b* обусловлено наличием в промежутке между колеблющимся торцом излучателя и термопластичной вставкой дополнительно двух металлических сеток, уменьшающих передачу ультразвуковой энергии в зону сварки. С увеличением времени сварки выше оптимального значения  $t=1,7$  с незначительное снижение разрывного усилия связано с деструкцией полимерного материала гибридного соединения.

Таким образом, на примере изготовления фильтрующего элемента масляного фильтра показано, что разработанная технология соединения многокомпонентных металлополимерных структур методом ультразвуковой сварки с использованием термопластичного полимерного материала в качестве клеевого расплава может с

успехом заменить методы механического крепления и клеевого соединения. При этом производительность процесса изготовления фильтрующего элемента возрастает в 7 раз по сравнению с методом механического крепления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Amancio Filho, S. T., Blaga L. A. / Joining of polymer-metal hybrid structures: Principles and applications // John Wiley & Sons, 2018.
2. Wagner, G., Balle F., Eifler, D. / Ultrasonic Welding of Hybrid Joints. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society // (JOM)-2012. – Vol. 64, 3. – pp. 401–406.
3. Benatar, A. and Cheng, Z. / Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Far-field// Polymer Engineering and Science. (1989) 29(23): 1699–1704.
4. Duley, W. W. and Mueller, R. E. / CO2 Laser Welding of Polymers // Polymer Engineering and Science. 32(9): (1992). 582–585.
5. Yarlagadda, S., Fink, B. K., and Gillespie, Jr., J. W. / Resistive Susceptor Design fo Uniform Heating During Induction Bonding of Composites // Journal of Thermoplastic Composites. (1998). 11: 321–337.
6. Волков, С. С., Розанов, Д. С., Станкевич, И. В. / Разработка и исследование основных особенностей соединения пластмасс с металлами // Известия высших учебных заведений. – Машиностроение, 2020. – № 3. – С. 15–22.
7. Рубаник, В. В., Луцко, В. Ф., Шрубиков, С. Н., Попова, О. С., Шурмелевич, Д. Д. / Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных материалов. ПОЛИКОМТРИБ-2015 // Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель: ИММС, НАНБ, 2015. – С. 112.

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТРИП-СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С УЛЬТРАЗВУКОМ

Пахомов М.А.<sup>1</sup>, Столяров В.В.<sup>1</sup>, Рубаник В.В.<sup>2</sup>, Царенко Ю.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск

<sup>†</sup>vlstol@mail.ru

В данном исследовании объектом являлась ТРИП сталь, в которой под действием пластической деформации возможно превращение метастабильной аустенитной фазы в мартенситную. Такая сталь обладает удачным комплексом механических свойств, сочетанием высоких прочности и пластичности [1]. Научный и практический интерес представляет исследование воздействия ультразвуковых колебаний (УЗК) на микроструктуру и температуры мартенситного превращения, обуславливающие прочность и пластичность ТРИП-стали.

В качестве образцов служила тонкая лента толщиной 0,3–0,35 мм из метастабильной аустенитной трип-стали ВНС9-Ш (23Х15Н5АМ3-Ш). Структура поверхности образцов состояла из мартенсита деформации и метастабильного нагартованного аустенита (47 и 53 % соответственно по данным рентгеноструктурного анализа). Фазовый состав образцов определяли методом рентгеноструктурного анализа (РСА) в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV; точность определения составляла около 5 об. %. РСА выполняли вдали от места окончательного разрушения и области сопряжения лопатки с рабочей частью образца.

Образцы в форме двусторонней лопатки с размером рабочей части 3×33 мм испытывали на статическое растяжение. В качестве одного из зажимов испытательной машины использовали специальный волновод УЗК, в котором фиксировался образец ТРИП-стали (рис. 1). Амплитуда колебаний составляла 5 и 10 мкм, частота колебаний – 20 кГц. Скорость растяжения – 20 мм/мин.



Рисунок 1 – Установка для растяжения образцов с ультразвуком

Часть образцов была подвергнута ультразвуковой обработке (УЗО) с амплитудой 10 мкм в течение 20 с. После обработки были выполнены измерения микротвердости и механические испытания на растяжение. УЗО не оказала заметного влияния на величину микротвердости образцов, однако, относительное удлинение ТРИП-стали при этом несколько снизилось. При кратковременном воздействии УЗК при растяжении образцов наблюдали небольшие пики снижения усилия деформирования, прочностные свойства ТРИП-стали при этом не изменились.

### ЛИТЕРАТУРА

1. К. Н. Lo, С. Н., Shek, J. K. L. Lai. Mater. Sci. Eng. R. 65, 39 (2009).

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЦИНКА

Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Ломач М.С., Луцко В.Ф., Дедюро В.В.  
Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь,  
marischa-08@tut.by

Равноканальное угловое прессование (РКУП) является одним из способов интенсивной пластической деформации металлических материалов, позволяющих получать массивные заготовки с ультрамелкозернистой структурой за счет объемного наноструктурирования [1].

При интенсивной пластической деформации металлы и сплавы приобретают свойства не типичные для обычных металлов: сверхпластичность при низких температурах или высоких скоростях деформации, уникально высокая прочность при высокой пластичности, рекордная усталостная прочность, уменьшение деградации свойств при радиационных воздействиях [2,3]. Метод интенсивной пластической деформации применяется для получения субмикроструктурной структуры таких металлов, как Cu, Pd, Fe, Ni, Co, сплавов на основе алюминия, магния, титана, цинка и др.

Для снижения деформационных усилий разрабатываются различные устройства и приемы [3]. В частности, предложено интенсифицировать процесс прессования за счет энергетического ультразвукового воздействия [4–6]. Действительно, ультразвуковые колебания (УЗК) снижая силы трения влияют как на протекание процесса прессования, так и на свойства полученных заготовок.

В качестве материала для проведения РКУП был выбран цинк. Заготовка имела размеры: длина – 20 мм, диаметр – 5 мм (рис. 1). Источником УЗК служил ультразвуковой генератор УЗГ2-4М мощностью 4,5 кВт с магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18. Частота колебаний составляла  $\approx 18$  кГц, амплитуда колебаний  $\sim 30$  мкм.

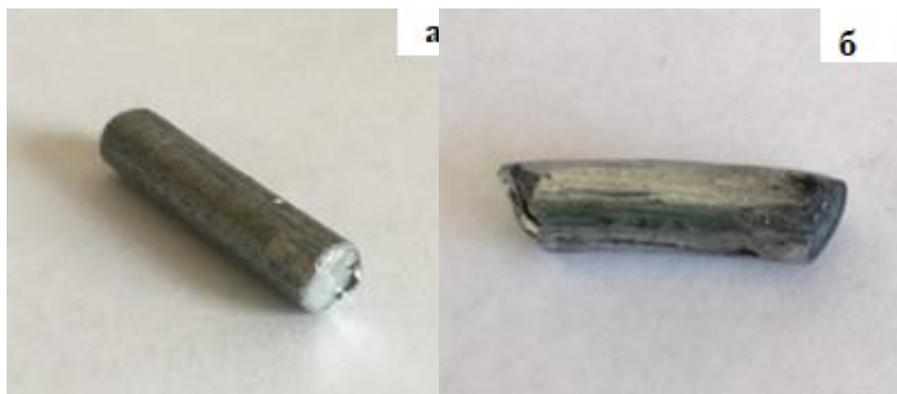


Рисунок 1 – Вид исходной заготовки цинка для РКУП (а) и после одного прохода (б)

Установлено, что наложение УЗК в процессе РКУП приводит к снижению усилия прессования в 1,5–2 раза. При этом после одного прохода микроструктура материала, полученного прессованием с наложением УЗК и без сильно не отличаются (рис. 2).

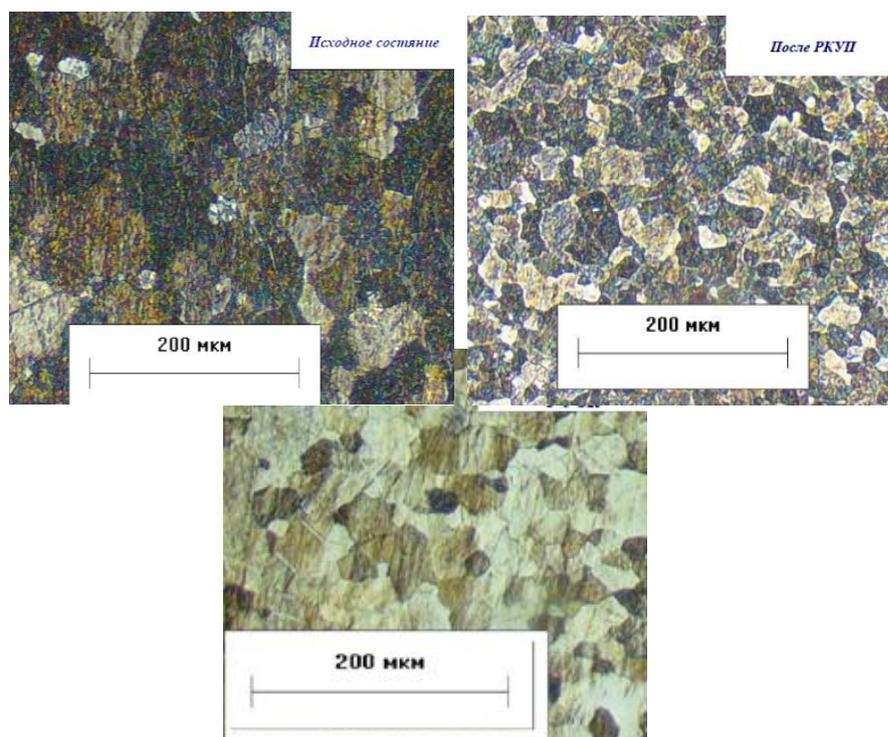


Рисунок 2 – Микроструктура цинка

Таким образом, использование ультразвука при РКУП позволяет существенно (в 1,5–2 раза) снизить усилие прессования.

В дальнейшем представляет интерес изучение структуры и свойств материала после РКУП с наложением УЗК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегал, В. И. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов [и др.]. – Минск: Наука и Техника, 1994, – 232 с.
2. Лякишев, Н. П. Конструкционные наноматериалы. Технология легких сплавов. – 2006. – № 3. – С. 40–49.
3. Валиев, Р. З. Объёмные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкн., 2007. – 397 с.
4. Шилин, А. Д. Ультразвуковая механоактивация порошковых материалов / А. Д. Шилин, В. В. Рубаник, В. В. Рубаник (мл.) // Перспективные материалы и технологии / под. ред. В. В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 30. – С. 630–651.
5. Хасанов, О. Л., Двилис, Э. С., Похолков, Ю. П. Соколов, В. М. Механизмы ультразвукового прессования керамических нанопорошков // Перспективные материалы. – 1999. – № 3. – С. 88–94.
6. Djavanroodi, F. Experimental investigation of ultrasonic assisted equal channel angular pressing process / F. Djavanroodi, H. Ahmadian, R. Naseri, K. Koohkan, M. Ebrahimi // Archives of Civil and Mechanical Engineering Volume 16, Issue 3, May 2016. – P. 249–255.

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Шилин А.Д., <sup>2</sup>Рубаник О.Е., <sup>3</sup>Шилина М.В.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики» НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь

<sup>2</sup>УО «Витебский государственный технологический университет»,  
г. Витебск, Беларусь

<sup>3</sup>УО «Витебский государственный университет», г. Витебск, Беларусь

В данной работе решалась задача получения и исследования механоактивированных порошковых материалов, установления закономерностей измельчения неорганических веществ, повышения технологических параметров порошковых материалов в процессе механоактивации исходных порошков с использованием ультразвуковых колебаний (УЗК) малой интенсивности [1].

Ультразвуковую обработку порошков осуществляли в жидкой среде, в кавитационном режиме с использованием генератора мощностью 0,4 кВт. Время обработки составляло до 90 минут, амплитуда УЗК – 30 мкм, частота – 18,5 кГц. В качестве среды использовали спирт. Выбор спирта в качестве среды для дробления исходных порошков обусловлен тем, что при высыхании обработанной партии частицы порошка менее склонны к повторному образованию агломератов. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) была выполнена в режиме отражения. Погрешность определения геометрических размеров методом СЭМ составляет 3 %.

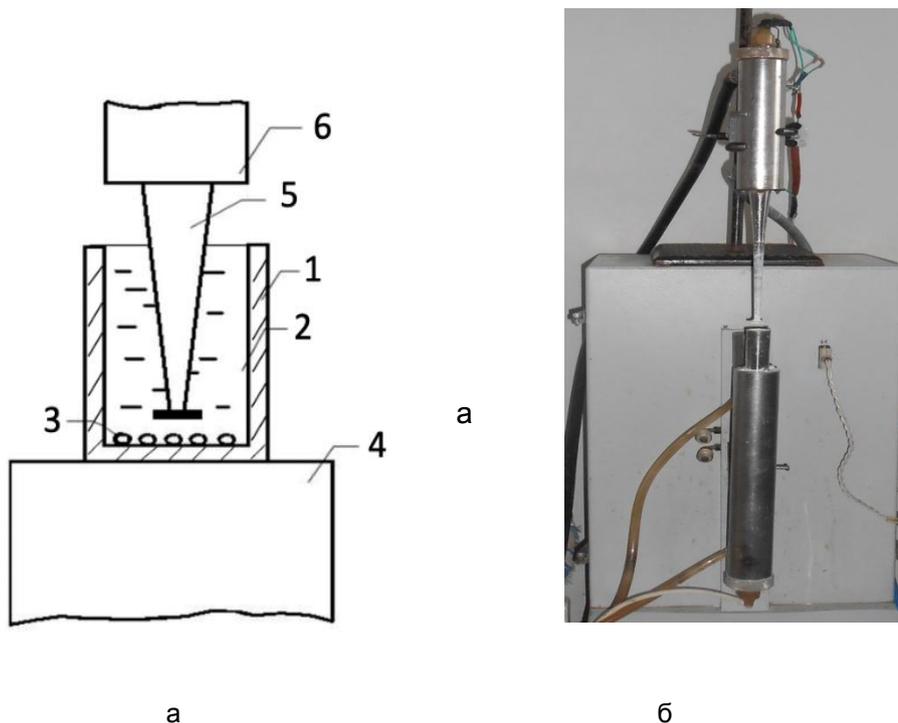


Рисунок 1 – Схема механоактивации порошковых материалов при возбуждении УЗК одновременно посредством кюветы (1) и погружного волновода (5) (а) и вид экспериментальной установки (б): 1 – кювета; 2 – жидкость; 3 – обрабатываемый порошок; 4, 6 – магнитострикционный преобразователь; 5 – концентратор ультразвука

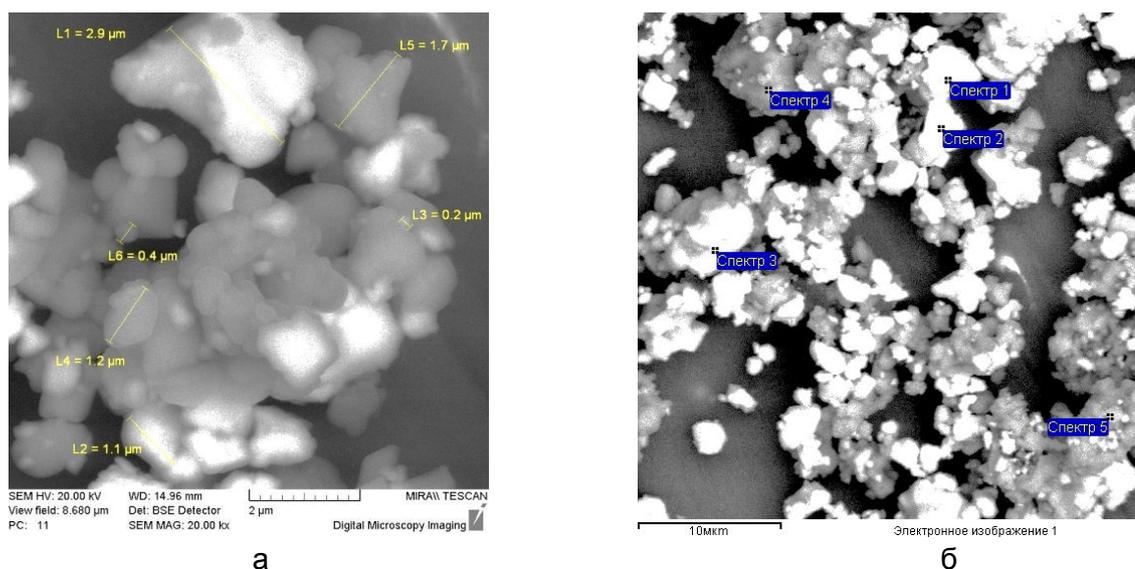


Рисунок 2 – Микроструктура порошка исходного состава пресс-порошка ЦТС-19 после предварительного синтеза и дополнительного помола

Исходный состав имел средний размер зерен 1,2 мкм и большой разброс по размеру зерен (рис. 2 а). Элементарный состав участков зерен (рис. 2 в) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Элементарный состав по данным электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа пресс-порошка ЦТС-19 после предварительного синтеза и дополнительного помола

Спектр	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn	Sr	Zr	Pb
Спектр 1	9.8	0.8	3.0	2.1	0.6	1.1	12.8	52.7
Спектр 2	9.3	0.5	18.0	3.8	0.1	0.0	8.6	44.5
Спектр 3	6.8	1.4	5.6	2.9	0.2	1.3	12.1	53.7
Спектр 4	0.3	0.8	50.9	18.9	5.6	0.2	0.0	2.0
Спектр 5	0.2	0.7	49.3	23.4	2.8	0.0	0.4	1.8

Все результаты в весовых %

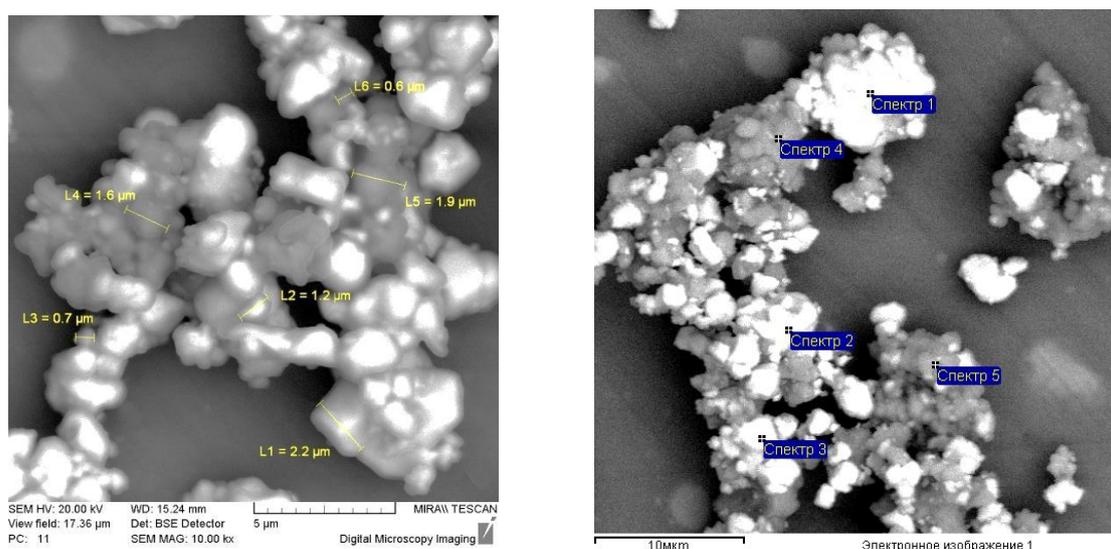


Рисунок 3 – Микроструктура порошка состава ЦТС-19 после обработки на встречных ультразвуковых потоках в течение 30 минут

Обработка исходного состава УЗК в течение 30 минут не изменило средний размер зерен уменьшив разброс по размеру зерен.

Таблица 2 – Элементарный состав по данным электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа состава ЦТС-19 после обработки ультразвуком в течение 30 минут

Спектр	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn	Sr	Zr	Pb
Спектр 1	7.8	0.9	2.3	0.9	0.5	1.4	13.5	56.8
Спектр 2	7.3	0.6	3.0	3.1	0.3	1.7	13.6	54.4
Спектр 3	7.2	0.2	3.2	2.6	0.1	1.8	14.3	54.6
Спектр 4	0.3	0.7	50.1	20.5	4.6	0.1	0.2	2.4
Спектр 5	0.8	1.0	43.3	20.9	3.2	0.4	1.1	8.5

Все результаты в весовых %

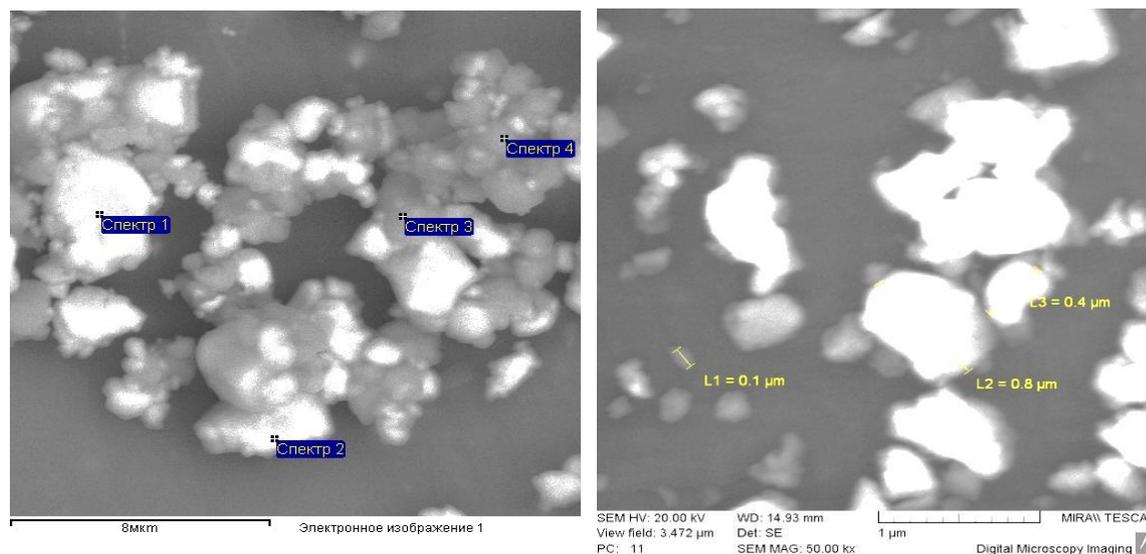


Рисунок 4 – Микроструктура порошка состава ЦТС-19 после обработки на встречных ультразвуковых потоках в течение 90 минут

При воздействии УЗК в течение 90 минут средний размер зерен уменьшился и составил 0,4 мкм.

Таблица 3 – Элементарный состав по данным электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа состава ЦТС-19 после обработки ультразвуком в течение 90 минут

Спектр	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn	Sr	Zr	Pb
Спектр 1	7.8	0.7	0.6	0.4	0.1	1.5	15.7	57.2
Спектр 2	9.2	1.1	3.0	2.0	0.0	0.6	13.3	55.1
Спектр 3	1.3	0.7	40.5	18.8	3.2	0.6	2.7	11.7
Спектр 4	0.5	0.8	45.2	20.9	3.0	0.4	0.7	7.5

Все результаты в весовых %

Полученные результаты показывают, что измельчение керамического порошка возможно при малой интенсивности УЗК. Обработка порошка состава ЦТС-19 на встречных ультразвуковых потоках в течение 90 минут в спирте дало уменьшение среднего размера зерен с 1,2 до 0,4 мкм. Данные рентгенофлуоресцентного анализа свидетельствуют о сохранении неравномерности распределения элементного состава (табл. 1–3), что свидетельствует о разрушении зерен по дефектам их структуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвуковая механоактивация порошков (Tran B. T., Doan D. Ph., Nguyen V. L., Rubanik V. V., Shylin A. D. Effect of ultrasonic-assisted compaction on density and hardness of Cu-CNT nanocomposites sintered by capsule-free hot isostatic pressing // Acta Metallurgica Slovaca. – 2017. – Vol. 23, No. 1. – P. 30–36.

## АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗА

<sup>1</sup>Луцко В.Ф., <sup>1</sup>Круглешов А. А., <sup>1</sup>Лабецкий В.С., <sup>2</sup>Казьмин А.А.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь

<sup>2</sup>УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

г. Гродно, Беларусь

*lutsko\_v@mail.ru*

Успешное применение ультразвуковой техники и технологии предполагает использование сложных ультразвуковых систем, проектирование и изготовление которых представляет трудоемкую задачу. В частности, высокие требования предъявляются к акустическим системам ультразвукового реза полотно автомобильных шин, которые должны обеспечивать амплитуду механических смещений режущей кромки ножа до 100 мкм. Ультразвуковая резка отличается от обычной тем, что наряду с поступательным движением ножа в нем возбуждаются ультразвуковые колебания [1]. Типичная ультразвуковая система (рис.1) реза включает в себя четыре основных компонента: ультразвуковой генератор (не показан), пьезоэлектрический преобразователь 1, бустер 2 и ультразвуковой нож 3 резонансных размеров. Ультразвуковой генератор представляет собой электронное устройство, которое трансформирует стандартное линейное напряжение 220 В переменного тока частотой 50 Гц в высокочастотные колебания. Ультразвуковой преобразователь представляет собой электромеханическое устройство, которое преобразует полученные высокочастотные электрические колебания от генератора, например, 20 кГц, в механические колебания той же частоты. Бустер представляет собой металлический волновод – концентратор, который увеличивает амплитуду механических колебаний ультразвукового ножа. Важнейший элемент системы – ультразвуковой нож, который выполняет резку заготовки полотна шин.

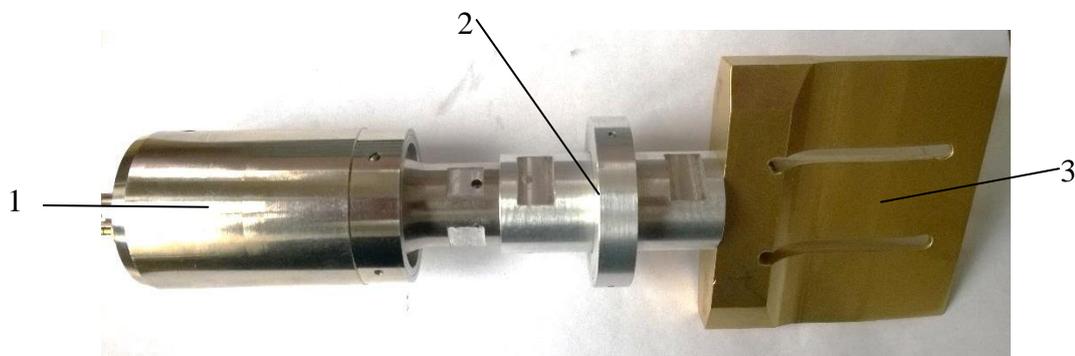


Рисунок 1 – Ультразвуковая система реза: 1 – пьезоэлектрический преобразователь, 2 – бустер, 3 – ультразвуковой нож

Ультразвуковой нож является единственной частью системы, которая уникальна для каждого процесса и обычно предназначен для работы на продольной моде колебаний в диапазоне частот 20–40 кГц. Чтобы уменьшить потери энергии и неравномерное распределение амплитуды колебаний на режущей кромке, вызванные поперечными колебаниями в направлении ширины ультразвукового ножа, в нем выполняют щели [3]. Как правило, ножи изготавливаются из титановых сплавов, которые имеют высокую усталостную прочность и низкие акустические потери.

Одной из важных характеристик конструкции ножа является резонансная частота колебаний. Резонансная частота волновода, имеющего простую геометрическую форму, может быть определена аналитически. Однако сложная геометрия ультразвукового ножа не позволяет произвести такой расчет.

Для эффективного резания режущая кромка лезвия должна быть тонкой. Как следствие, из-за высоких знакопеременных напряжений и малого поперечного сечения в материале ножа образуются трещины, приводящие к его поломке. Поэтому

геометрия и форма ножа должны быть очень тщательно разработаны, чтобы обеспечить ему высокую амплитуду колебаний и долговечность.

Работа посвящена определению методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS резонансной частоты колебаний ультразвукового ножа и места расположения максимального напряжения на режущем лезвии с целью повышения его эксплуатационных характеристик. При этом не учитывалось нелинейное взаимодействие волн с неосновными модами колебаний. Также не учитываются при расчете резонансных частот внутренние потери в системе.

В качестве материала ножа выбран титановый сплав ВТ6 плотностью  $\rho=4,5 \text{ г/см}^3$ , модулем упругости  $E=113 \text{ Гпа}$  и коэффициентом Пуассона  $\mu=0,34$ . Возбуждающая сила, имитирующая работу пьезокерамики, приложенная к режущей кромке ножа, равнялась 100 Н. Выбранный заранее предполагаемый участок частоты для возбуждающей силы, на котором проводили расчёт амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, а также напряжений, находился в диапазоне 38–41 кГц. Стандартное окружение среды – воздух.

На рисунке 2 показаны результаты расчета вышеуказанных частотных характеристик ряда мод в заданном диапазоне частот для ультразвукового ножа. Резонансная частота ножа 40700 Гц соответствует наибольшему значению амплитуды колебаний на графике амплитудно-частотной характеристики и в месте, где происходит переход фазы  $0^\circ$  в  $180^\circ$  или наоборот на графике фазочастотной характеристики.

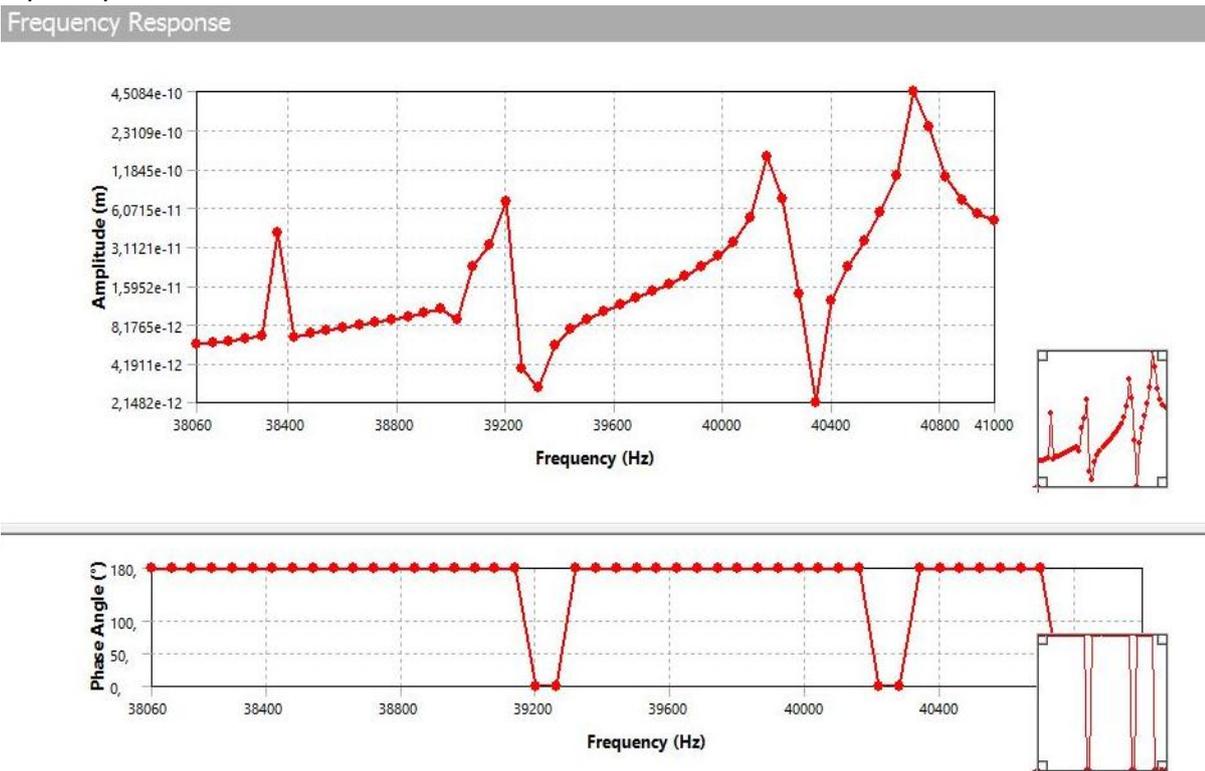


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики ультразвукового ножа

На рисунке 3 представлена фотография ножа (рис. 3 а) с образовавшейся на нем трещиной от воздействия небольшого цикла ультразвуковых колебаний (знакопеременных напряжений) и модель распределения напряжений в ноже (рис. 3 б), полученная методом конечных элементов.

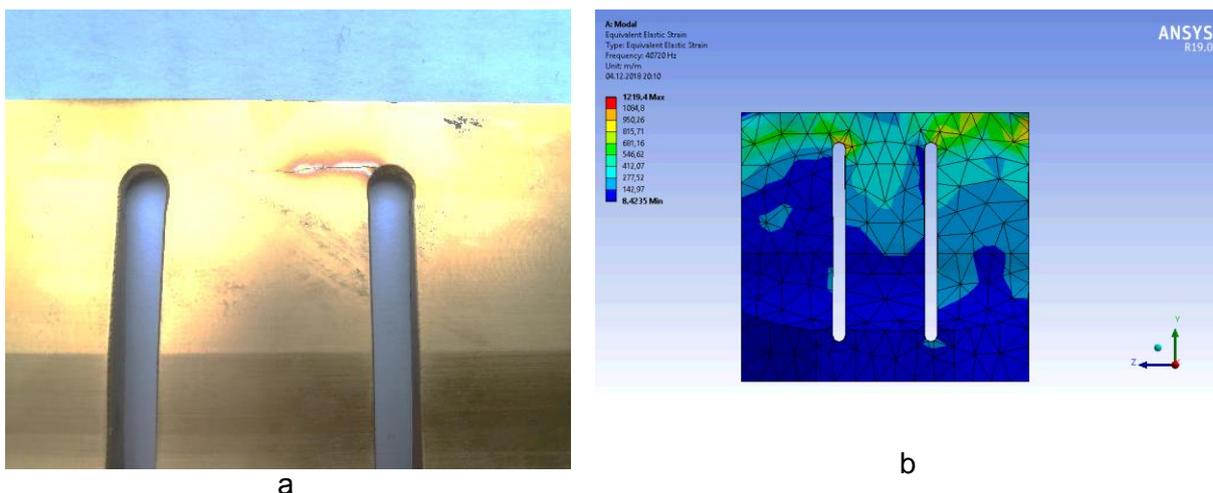


Рисунок 3 – Ультразвуковой нож; а- фотография лезвия ножа с трещиной, б – модель распределения механических напряжений в ноже

Как видно, место расположения трещины на режущей кромке ножа (рис. 3 а) соответствует максимальным напряжениям (рис. 3 б) на лезвии ножа, полученным методом конечных элементов. Очевидно, что в этом случае, необходимо вместо титанового сплава ВТ6 выбрать другой сплав с более высокими прочностными характеристиками, материал которого сможет выдерживать длительное воздействие ультразвуковых колебаний, либо внести изменения в геометрию ножа для снижения механических напряжений, приводящих к возникновению и развитию трещин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schneider, Y., Zahn, S., and Rohm, H. (2011). Ultrasonic cutting of foods. In *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, (eds.) Feng, H., Barbosa, G. V., Weiss, J. Springer, New York, NY.
2. Stepanenko A. V., Kim H. and Prokhorenko P. P., Theory and Calculation of an Ultrasonic Waveguide with a Wide Output-Cross-Section, *Russian Ultrasonics*, pp. 178–182, January, 1979.
3. Абрамова, А. В. Анализ методов расчета и конструирования волноводных систем для ультразвуковых установок технологического назначения // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 90–96.

**Авторский указатель**

Alexiev A.R.	59	Гульпа Д.Ю.	75
Barsukov R.V.	10	Данилов И.В.	19, 21
Bui Hung Thang	103, 106	Дедюро В.В.	132
Bukharov S.N.	59	Дежкунов Н.В.	48, 51, 86
Calligaris F.	54	Диденкулов И.Н.	33
Dezhkunov N.V.	54	Дородейко В.Г.	119
Doan Dinh Phuong	103, 106	Егоров А.Р.	108, 111
Genne D.V.	10	Ефремовцев Н.Н.	7
Golykh R.N.	10	Казьмин А.А.	125, 127, 137
Khmelev V.N.	10	Карасева Е.В.	91
Kotukhov A.V.	54	Касимцев А.В.	113
Kozhushko V.V.	59	Кимстач О.В.	127
Krasouski A.V.	54	Кожевников О.Е.	89
Labetski V.S.	106	Кожушко В.В.	56
Liu Y.	97	Колодинская Н.С.	123
Lutsko V.F.	106	Константинов П.Е.	108, 111
Nguyen Viet Dung	103	Короткевич С.В.	30
Pham Van Trinh	103, 106	Котухов А.В.	48
Quan Qiquan	10	Кочанов А.Н.	72
Rubanik V.V.	103, 106	Кочанов С.А.	72
Rubanik V.V.jr.	103, 106	Критченков А.С.	108, 111
Savitski V.O.	103, 106	Критченков И.С.	108, 111
Sergienko V.P.	59	Круглешов А.А.	125, 137
Tran Van Hau	106	Кузьмар И.И.	75
Tuleika A.S.	59	Кулак М.М.	123
Wang J.T.	97	Курилёнок А.А.	5
Абрамов В.О.	13	Кушнер Л.К.	75
Абрамова А.В.	13	Лабецкий В.С.	94, 127, 137
Алимов И.А.	113	Лалетин В.М.	115
Артемьев А.А.	111	Лбов А.А.	26
Баглюк Г.А.	69	Ломач М.С.	132
Барсуков А.Р.	38	Луцко В.Ф.	127, 132, 137
Барсуков Р.В.	38	Малыхин Д.Г.	89
Баязитов В.М.	13	Мац А.В.	91
Безымянный Ю.Г.	69	Меринов В.К.	56
Белоцерковский М.А.	5	Минчук В.С.	48, 51, 86
Белявин К.Е.	5	Муллакаев М. С.	34
Беляев С.П.	123	Муллакаев Р.М.	34
Боченков А.С.	23, 78	Муравьев С.И.	62
Бражкин В.В.	19, 21	Мурзинова М.А.	16
Быша В.В.	113, 123	Мухаметгалина А.А.	16
Викулова Т.С.	33	Назаров А.А.	16
Володько С.С.	113	Неверов А.Н.	41
Вьюгинов С.Н.	26	Нестеров В.А.	23, 44, 66, 78, 82
Вьюгинова А.А.	26	Никонов Р.В.	13
Вьюненко Ю.Н.	62	Новик А.А.	26
Гаврилюк В.А.	48	Новик А.А.	26
Гаврилюк В.С.	86	Пахомов М.А.	131
Генне Д.В.	44	Пашкевич Ю.Г.	108
Голых Р.Н.	38	Перхунова А.Ю.	51
Гриб А.Ф.	86	Петрова-Буркина О.А.	97, 108, 111, 113
Григорьев А.Я.	56	Пилипенко Н.Н.	89
Громницкая Е.Л.	19, 21		
Грудю С.К.	100		

Поддубная Н.Н.	115
Попова О.С.	127
Реснина Н.Н.	123
Рубаник В.В.	94,97,108,111, 113,115,119,123, 127,131,132
Рубаник В.В.мл.	108,111,113, 119,123,132
Рубаник О.Е.	134
Рухман А.А.	34
Савчук Е.С.	91
Салак А.Н.	108
Сарваров Д.Г.	34
Сергиенко В.П.	56
Симова С.Н.	119
Систер В.Г.	13
Смирнов В.В.	62
Соколенко В.И.	91
Сосновский И.А.	5
Столяров В.В.	131
Сятковский А.И.	62
Талько О.В.	69
Терентьев С.А.	23
Тертишников П.П.	44,78
Федоринчик М.П.	51
Федулов И.С.	13
Хаймович П.А.	89
Хлопков Е.А.	62
Хмелев В.Н.	23,38,44,66,78,82
Хмелев М.В.	66
Царенко Ю.В.	94,97,131
Цыганок С.Н.	66
Шалунов А.В.	23,44,78,82
Шилин А.Д.	134
Шилина М.В.	134
Шило А. В.	108
Шульгин Н.А.	89
Юдин С.Н.	113

СОДЕРЖАНИЕ

<b>Белоцерковский М.А., Белявин К.Е., Сосновский И.А., Курилёнок А.А.</b> ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ	5
<b>Ефремовцев Н.Н.</b> К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ КОМПОНЕНТОВ ЭНЕРГОЕМКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ И ДРУГИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ. СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	7
<b>Khmelev V.N., Golykh R.N., Quan Qiquan, Barsukov R.V., Genne D.V.</b> APPROACHES TO INCREASING THE EFFICIENCY OF ULTRASONIC DRILLING OF EXTRATERRESTRIAL OBJECTS SOIL	10
<b>Федулов И.С., Систер В.Г., Абрамов В.О., Абрамова А.В., Никонов, Р.В., Баязитов В.М.</b> ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОТОЧНЫХ РЕАКТОРАХ	13
<b>Мухаметгалина А.А., Мурзинова М.А., Назаров А.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ	16
<b>Данилов И.В., Громницкая Е.Л., Бражкин В.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАМАНТАНА И ХЛОРАДАМАНТАНА ПРИ ПЕРЕХОДАХ ПОРЯДОК-БЕСПОРЯДОК	19
<b>Данилов И.В., Громницкая Е.Л., Бражкин В.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЛИГОМЕРОВ ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	21
<b>Боченков А.С., Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Терентьев С.А., Нестеров В.А.</b> УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СУШИЛКИ БАРАБАННОГО ТИПА ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	23
<b>Вьюгинова А.А., Новик А.А., Вьюгинов С.Н., Лбов А.А., Новик А.А.</b> УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И ПАЙКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ	26
<b>Короткевич С.В.</b> ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ СРЕДЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НИКЕЛЯ ПРИ МИКРОУДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПУЗЫРЬКОВ КАВИТАЦИИ	30
<b>Викулова Т.С., Диденкулов И.Н.</b> ДВИЖЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВ В ПРОТОЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	33
<b>Муллагаев М. С., Сарваров Д.Г., Рухман А.А., Муллагаев Р.М.</b> ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ТЯЖЕЛОЙ И ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ	34

<b>Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р.</b> РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЙ	38
<b>Неверов А.Н.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРА	41
<b>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Тertiшников П.П., Генне Д.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЕЗИНФИЦИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ	44
<b>Дежкунов Н.В., Минчук В.С., Гаврилюк В.А., Котухов А.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС: ХАРАКТЕРИСТИКА И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ	48
<b>Минчук В.С., Перхунова А.Ю., Федоринчик М.П., Дежкунов Н.В.</b> КОРРЕЛЯЦИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА	51
<b>Dezhkunov N.V., Calligaris F., Krasouski A.V., Kotukhov A.V.</b> METHOD FOR ESTIMATION OF ULTRASOUND EFFECT ON MASS EXCHANGE IN CLOSED CAPILLARY CHANNELS	54
<b>Меринов В.К., Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Григорьев А.Я.</b> ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	56
<b>Kozhushko V.V., Bukharov S.N., Tuleika A.S., Sergienko V.P., Alexiev A.R.</b> ACOUSTIC COMPOSITES BASED ON BUCKWHEAT HUSK AND EPOXY RESIN	59
<b>Смирнов В.В., Сятковский А.И., Муравьев С.И., Хлопков Е.А., Вьюненко Ю.Н.</b> ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РУК ОТ ВИБРАЦИИ	62
<b>Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелев М.В., Нестеров В.А.</b> НОВЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	66
<b>Баглюк Г.А., Безымянный Ю.Г., Талько О.В.</b> ОТОБРАЖЕНИЕ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВЫХ ГОРЯЧЕШТАМПОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ	69
<b>Кочанов А.Н., Кочанов С.А.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВИБРАЦИЙ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В КВАРЦЕВОМ ПЕСЧАНИКЕ	72
<b>Кузьмар И.И., Гульпа Д.Ю., Кушнер Л.К.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СПЛАВОВ	75

<b>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Тertiшников П.П., Боченков А.С.</b> ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПОРШНЕВОГО ТИПА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ	78
<b>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А.</b> ПУТИ РАЗВИТИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ	82
<b>Гриб А.Ф., Гаврилюк В.С., Минчук В.С., Дежкунов Н.В.</b> РАССЕЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА НА ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ	86
<b>Булатов А.С., Клочко В.С., Корниец А.В., Соколенко В.И., Спицына В.И., Хаймович П.А., Шульгин Н.А., Кожевников О.Е., Пилипенко Н.Н., Малыхин Д.Г.</b> НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СВОЙСТВА ЭКСТРУДИРОВАННОГО ВЫСОКОЧИСТОГО ГАФНИЯ	89
<b>Соколенко В.И., Карасева Е.В., Мац А.В., Савчук Е.С.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ И СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ Zr, СПЛАВОВ Zr1Nb И Zr-2,5%Nb	91
<b>Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Лабетский В.С.</b> СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ ПРОВОЛОКИ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ	94
<b>Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Петрова-Буркина О.А., Wang J.T., Liu Y.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	97
<b>Грудо С.К.</b> ПОВЫШЕНИЕ ТИРАЖЕСТОЙКОСТИ ФЛЕКСОГРАФСКИХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ ПУТЕМ ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ	100
<b>Rubanic V.V., Savitski V.O., Rubanic V.V.jr., Bui Hung Thang, Doan Dinh Phuong, Pham Van Trinh, Nguyen Viet Dung</b> PROPERTIES OF RUBBER-BASED POLYMERS MODIFIED WITH GRAPHENE STRUCTURES	103
<b>Rubanic V.V., Savitski V.O., Rubanic V.V.jr., Lutsko V.F., Labetski V.S., Bui Hung Thang, Doan Dinh Phuong, Pham Van Trinh, Tran Van Hau</b> ULTRASONIC LIQUID-PHASE EXFOLIATION OF GRAPHITE AT EXCESSIVE HYDROSTATIC PRESSURE	106
<b>Критченков А.С., Критченков И.С., Рубаник В.В., Рубаник В.В.мл., Петрова-Буркина О.А., Константинов П.Е., Егоров А.Р., Салак А.Н., Шило А. В., Пашкевич Ю.Г.</b> СИНТЕЗ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНИОНООБМЕННЫЕ СВОЙСТВА СЛОИСТОГО ДВОЙНОГО ГИДРОКСИДА КОБАЛЬТА-АЛЮМИНИЯ	108

<b>Критченков А.С., Критченков И.С., Рубаник В.В., Рубаник В.В.-мл., Петрова-Буркина О.А., Константинов П.Е., Егоров А.Р., Артемьев А.А.</b> ПРОМОТИРУЕМОЕ УЛЬТРАЗВУКОМ АЗИД-ИНОВОЕ 1,3-ДИПОЛЯРНОЕ ЦИКЛОПРИСОЕДИНЕНИЕ В ХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ ХИТОЗАНА	111
<b>Юдин С.Н., Алимов И.А., Володько С.С., Касимцев А.В.</b> <b>Петрова-Буркина О.А., Рубаник В.В., Рубаник В.В.-мл., Быша В.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА ПОРОШКА СПЛАВА Ti-18Zr-15Nb, СИНТЕЗИРОВАННОГО ГИДРИДНО-КАЛЬЦИЕВЫМ МЕТОДОМ	113
<b>Рубаник В.В., Лалетин В.М., Поддубная Н.Н.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МУЛЬТИФЕРРОИКАХ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТ-ТИТАНАТ СВИНЦА И ФЕРРИТА НИКЕЛЯ	115
<b>Рубаник В.В., Симова С.Н., Рубаник В.В.мл., Дородейко В.Г.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАДАНИЕ ПАМЯТИ ФОРМЫ	119
<b>Рубаник В.В.мл., Реснина Н.Н., Кулак М.М., Быша В.В., Рубаник В.В., Беляев С.П., Колодинская Н.С.</b> ПОЛУЧЕНИЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ МЕТОДОМ СВС И НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ	123
<b>Круглешов А.А., Казьмин А.А.</b> МНОГОЦЕЛЕВОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ГЕНЕРАТОР	125
<b>Луцко В.Ф., Рубаник В.В., Лабецкий В.С., Кимстач О.В., Казьмин А.А., Попова О.С.</b> ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ	127
<b>Пахомов М.А., Столяров В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В.</b> ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТРИП-СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С УЛЬТРАЗВУКОМ	131
<b>Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Ломач М.С., Луцко В.Ф., Дедюро В.В.</b> ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЦИНКА	132
<b>Шилин А.Д., Рубаник О.Е., Шилина М.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	134
<b>Луцко В.Ф., Круглешов А. А., Лабецкий В.С., Казьмин А.А.</b> АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗА	137
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	140
СОДЕРЖАНИЕ	142



Научное издание

**ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА:  
РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Материалы международной  
научной конференции**

(Витебск, 25-28 мая 2021 года)

Ответственный за выпуск Царенко Ю.В.  
Оформление и компьютерная верстка Дубровской Т.С.

---

Подписано к печати 04.06.2021. Формат 60x90<sup>1/8</sup>. Усл. печ. листов 18,3.  
Уч.-изд. листов 14,3. Тираж 30 экз. Заказ № 122.

Выпущено редакционно-издательским отделом  
Витебского государственного технологического университета  
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.