



# **УЛЬТРАЗВУК:**

## **ПРОБЛЕМЫ, РАЗРАБОТКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

***Материалы международной научной конференции  
(г. Уфа, Россия, 25 – 29 сентября 2017 г.)***

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**УЛЬТРАЗВУК:  
ПРОБЛЕМЫ, РАЗРАБОТКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

***Материалы международной научной конференции  
(г. Уфа, Россия, 25 – 29 сентября 2017 г.)***

**Уфа  
РИЦ БашГУ**

УДК 534  
ББК 32.87  
У51

**Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы.**

У51 Материалы международной научной конференции (г. Уфа, Россия, 25 – 29 сентября 2017 г.) / отв. ред. А.А. Назаров. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2017.–138 с.

ISBN 978-5-7477-4436-3

В сборнике материалов международной конференции представлены результаты исследования процессов взаимодействия ультразвука высокой интенсивности с веществом, ультразвуковой обработки газов, жидкостей и твердых тел, влияния ультразвуковых колебаний на процессы деформации, дефектную структуру и свойства металлов и сплавов, в том числе аморфных и наноструктурных материалов, применения ультразвука для интенсификации технологических процессов, ультразвуковых и акусто-эмиссионных методов неразрушающего контроля материалов, а также проблем разработки ультразвукового технологического оборудования.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, интересующихся вопросами технической акустики, ультразвуковых технологий, материаловедения, в том числе научных работников, инженеров, преподавателей высших учебных заведений, аспирантов и студентов физических и технических направлений.

УДК 534  
ББК 32.87

ISBN 978-5-7477-4436-3

© БашГУ, 2017  
© ИПСМ РАН, 2017

# **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Назаров А.А.**

*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа  
aanazarov@imsp.ru*

При воздействии ультразвуковыми волнами в металлах и сплавах происходит ряд интересных физических явлений, зависящих от амплитуды волн. При малых амплитудах происходят колебания дислокаций около точек закрепления, которые приводят к демпфированию колебаний [1]. При большей амплитуде колебаний дислокации могут отрываться от препятствий, и такое повышение их подвижности приводит к акустопластическому эффекту (снижению напряжения течения при деформации) [2] или к релаксации напряжений в деформированных материалах [1]. Обработка ультразвуком высокой мощности приводит к интенсивной генерации дислокаций, формированию дислокационной субструктурьи и даже нанокристаллической структуры на поверхности металлов [3,4]. Ультразвук малой амплитуды широко применяется в исследованиях внутреннего трения в металлах, а высокоинтенсивная ультразвуковая обработка (УЗО) - для поверхностного упрочнения и финишной обработки материалов.

Менее исследовано воздействие ультразвука умеренной амплитуды, приводящее к релаксационным явлениям в деформированных металлах. Такое воздействие может приводить к значительному изменению структуры и свойств сильнонеравновесных материалов, таковыми, например, являются объемные ультрамелкозернистые (УМЗ) материалы, полученные деформационными методами. Многочисленные исследования этих материалов показали, что они обладают высокодефектной структурой, главным образом связанной с дислокациями, поглощенными границами зерен при деформации, благодаря которым последние обладают неравновесной структурой, характеризующейся высоким уровнем дальнодействующих упругих напряжений и избыточной энергии [5,6].

Неравновесная структура объемных УМЗ материалов обуславливает некоторые их недостатки, как, например, низкая термическая стабильность структуры, низкие значения пластичности и ударной вязкости. В связи с этим, исследование воздействия УЗО на УМЗ материалы и зависимости его результатов от амплитуды ультразвука представляет большой интерес с точки зрения улучшения комплекса механических свойств материалов.

В настоящей работе приводится краткий обзор результатов экспериментальных и теоретических исследований, проведенных автором и его коллегами в области УЗО УМЗ материалов.

Схема УЗО объемных материалов, в отличие от поверхностной УЗО, должна обеспечивать возможность создания знакопеременных напряжений сжатия-растяжения во всем объеме образца материала. Разработаны две схемы, с помощью которых это можно сделать. Первая схема (Рис. 1 а) позволяет осуществлять УЗО образцов в виде дисков небольшой толщины, в частности, образцов УМЗ материалов, полученных методом кручения под высоким давлением (КВД) или вырезанных из образцов, подвергнутых равноканальному угловому прессованию (РКУП). По второй схеме (Рис. 1 б) можно обрабатывать прутковые полуволновые образцы, полученные методом РКУП и, если необходимо, дополнительной экструзии. Обсуждены преимущества и недостатки этих схем, сформулированы нерешенные проблемы, связанные с режимами обработки по указанным схемам. В частности, существенным недостатком первой схемы является зависимость амплитуды и резонансной частоты колебаний от усилия сжатия образца в пучности напряжений [7], из-за чего трудно добиться повторяемости режима УЗО. Во втором случае имеет место неравномерное распределение амплитуды колебаний, что в зависимости от задач исследования может быть и недостатком, и преимуществом.

В соответствии с первой схемой проведены исследования воздействия УЗО с частотой 20 кГц на структуру и свойства УМЗ никеля технической чистоты НП2, полученного методом

КВД, и УМЗ сплава ВТ6, полученного РКУП. В первом случае были исследованы микроструктура, уровень внутренних напряжений и микротвердость, во втором - механические свойства при испытаниях на растяжение при различных значениях амплитуды осциллирующих напряжений сжатия-растяжения.

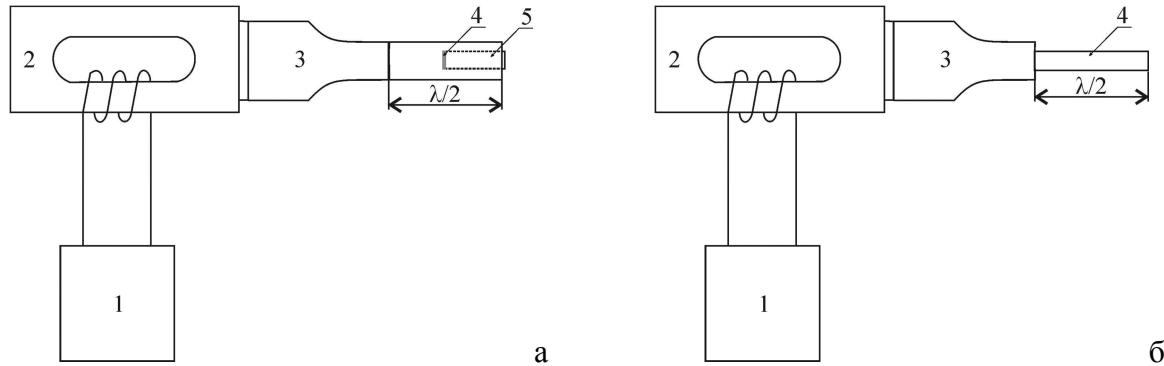


Рис. 1. Принципиальные схемы ультразвуковой обработки дисковых (а) и цилиндрических полуволновых (б) образцов: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – преобразователь; 3 – концентратор; 4 – образец, 5 – прижимной цилиндр

Эксперименты показали [8], что в УМЗ никеле после КВД с повышением амплитуды происходит некоторый рост микротвердости, уровня микроискажений и плотности дислокаций, затем в области амплитуде 60 МПа имеет место заметное снижение всех указанных характеристик по сравнению с исходным состоянием. При дальнейшем увеличении амплитуды напряжений до 90 МПа наблюдается их обратное повышение. При УЗО также происходит увеличение доли большеугловых границ зерен без значительного изменения среднего размера зерна.

При УЗО технически чистого никеля по второй схеме наблюдается одновременное повышение предела прочности и пластичности, зависящее от амплитуды УЗО; максимальный эффект достигается при амплитуде напряжений около 80 МПа [9]. Предварительные исследования УМЗ титанового сплава ВТ6 после РКУП и УЗО также показали возможность заметного повышения предела прочности этого материала путем УЗО.

Представление об одном из механизмов воздействия УЗО на неравновесную структуру УМЗ материалов дает моделирование методом молекулярной динамики. Показано [10], что при приложении к бикристаллу с неравновесной границей наклона [112], содержащей дефект в виде дисклинационного диполя, осциллирующих напряжений происходит асимметричный процесс испускания границей решеточных дислокаций, приводящее в релаксации поля дальнодействующих напряжений (Рис. 2 а,б) и соответствующему снижению избыточной энергии границы. Поведение решеточных дислокаций, унаследованных материалом от интенсивной пластической деформации, удобно исследовать моделированием в рамках двумерной дислокационной динамики.

В работе [11] исследовано поведение дисклинационных триполей при воздействии ультразвука и показано, что при нелинейной зависимости скорости дислокаций от напряжения (что наблюдается практически для всех материалов) симметричное осциллирующее напряжение приводит к поступательному (дрейфовому) движению триполя.

Проведено моделирование эволюции неупорядоченной системы дислокаций в зернах поликристалла с неравновесными границами зерен [12]. Исследование показало, что дрейф нескомпенсированных дислокационных мультиполей является типичным процессом при эволюции таких систем. В результате УЗО дислокации поглощаются границами так, что происходит компенсация дефектной структуры и дальнодействующих напряжений границы.

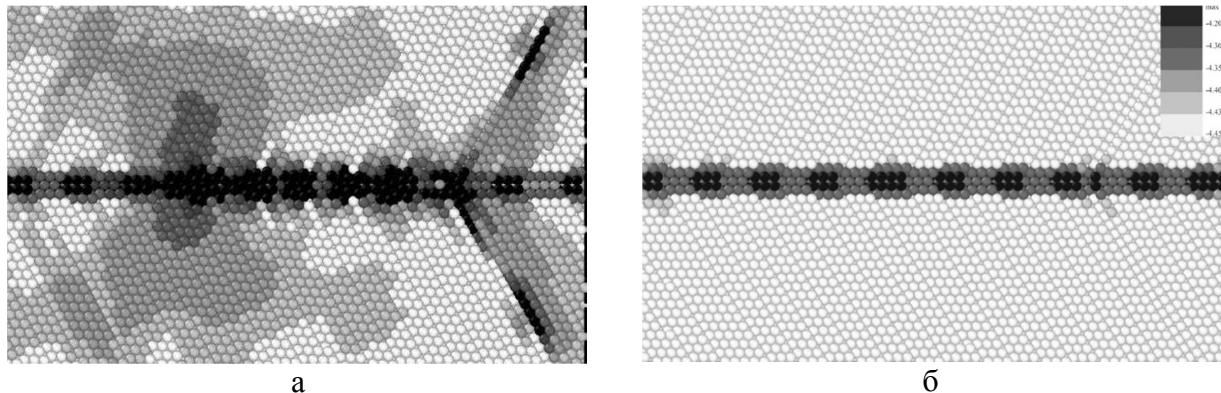


Рис. 2. Карты атомных напряжений в бикристалле, содержащем границу наклона  $\Sigma = 11 [112]$  с дисклинационным диполем, до (а) и после (б) воздействия ультразвука

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования демонстрируют принципиальную возможность эффективной модификации структуры и свойств УМЗ материалов путем ультразвукового воздействия.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

#### Литература

1. Кулемин А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 200 с.
2. Langenecker B. Work-softening of metal crystals by alternating the rate of glide strain // Acta Metall. 1961. 9. P. 937-940.
3. Mordyuk B.N., Prokopenko G.I. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management. J. Sound Vibr. 2007. V. 308. P. 855-866.
4. Лотков А.И., Батурина А.А., Гришков В.Н., Ковалевская Ж.Г., Кузнецов П.В. Влияние ультразвуковой пластической обработки на структурно-фазовое состояние поверхности никелида титана // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 21. С. 24-29.
5. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured materials / Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, ed. by W. Goddard, D. Brenner, S. Lyshevski, G. Iafrate. Boca Raton: CRC Press, 2002. P. 22-1 - 22-44.\
6. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Wiley: Hoboken, 2013.
7. Неверов А.Н. Влияние армирования на свойства составных стержневых колебательных систем // Эл. журнал «Техническая акустика». 2015. 2. 16 с.
8. Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Сергеев С.Н., Жиляев А.П., Назаров А.А., Загидуллина Ю.Р., Пархимович Н.Ю., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость ультрамелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2. С. 85-90.
9. Samigullina A.A. Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V., Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // Rev. Adv. Mater. Sci. 2014. V. 39. P. 48-53.
10. Nazarov A.A. Molecular dynamics simulation of the relaxation of a grain boundary disclination dipole under ultrasonic stresses // Letters on Materials. 2016. V. 6. No. 3. P. 179-182.
11. Мурзаев Р.Т., Бачурин Д.В., Назаров А.А. Взаимодействие дислокационных триполей со стоячей звуковой волной // ФММ. 2015. Т. 116. № 10. С. 1112–1120.
12. Мурзаев Р.Т., Бачурин Д.В., Назаров А.А. Релаксация остаточной дефектной структуры в деформированных поликристаллах под действием ультразвука // ФММ. 2017. Т. 118. № 7. В печати.

# РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИНСТИТУТА ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ НАН БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рубаник В.В., Клубович В.В., Царенко Ю.В.

ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск  
ita@vitebsk.by

Основная направленность, проводимых в ИТА НАН Беларуси исследований и разработок, ориентирована на создание новых современных ультразвуковых технологий для машиностроительного комплекса, энергетики, приборостроения, производства изделий медицинского назначения.

Значительное число разработок связано с ультразвуковой сваркой полимерных материалов. Она позволяет реализовать очень ценные технологические свойства процесса, такие как низкая требовательность к состоянию свариваемых поверхностей; локальное выделение тепла в зоне сварки и отсутствие перегрева материала; сварка материалов с узким интервалом кристаллизации; возможность сварки разнородных и разнотолщинных полимерных материалов. Ультразвуком хорошо сваривается большая группа термопластичных полимеров. Некоторые полимеры, например, полистирол, лавсан и другие, свариваются только ультразвуком.

В ИТА НАН Беларуси на базе современной цифровой схемотехники разработан переносной ультразвуковой аппарат (рис.1).

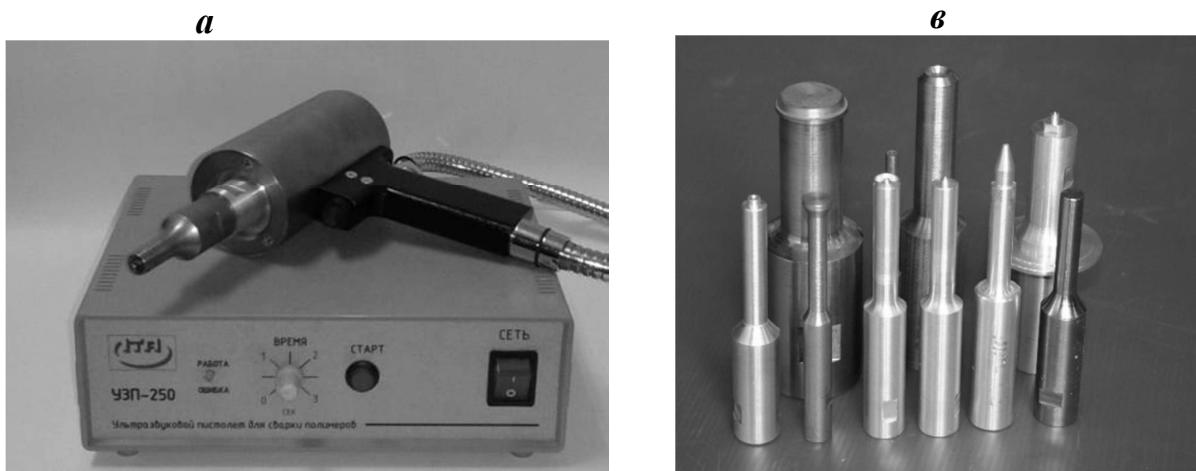


Рис. 1. Внешний вид аппарата для ультразвуковой сварки термопластичных полимеров (а) и излучателей с различной формой сварочных наконечников (в)

Так, Институтом разработан и серийно производится аппарат для ультразвуковой сварки полимерных магистралей систем переливания крови (рис.2), который относится к изделиям медицинского назначения. Прибор необходим для запаивания (герметизации) методом ультразвуковой сварки полимерных трубок пластиковых контейнеров, предназначенных для сбора, хранения и переработки крови, с одновременным разделением контейнера и подводящей трубки. Действие аппарата основано на ультразвуковом способе низкотемпературной сварки термопластичных материалов и обеспечивает 100% герметизацию полимерных трубок. Преимущества данной разработки – экологическая безопасность и малая энергоемкость процесса, производительность в 2 раза больше по сравнению со сваркой токами высокой частоты.

Применение ультразвуковых колебаний – эффективный способ генерации теплоты непосредственно в материал. Разработанные институтом технология и оборудование для УЗ тиснения изделий из кожи для придания ей оригинального и привлекательного вида, заключающийся в получении рельефного изображения на поверхности кожи нагретым до

определенной температуры инструментом (клише, штамп), широко используются в обувной промышленности (рис.3). Преимуществом технологии тиснения ультразвуком является оперативность, так как не требуется предварительного разогрева клише, как в обычных термопрессах. Суммарный эффект экономии электроэнергии достигает до 90% по сравнению с тиснением на термопрессе.



Рис. 2. Аппарат для ультразвуковой сварки магистралей систем переливания крови



Рис. 3. Ультразвуковая установка тиснения по коже

Разработанное и изготовленное институтом оборудование используется для ультразвуковой сварки верхней и нижней частей вставки ушной бирки для крупного рогатого скота, для сварки светотехнических изделий, изготовления деталей глубинных насосов и элементов обуви и одежды, для ультразвуковой упрочняющей и доводочной обработки изделий сложной геометрической формы: штамповой оснастки, пресс-форм и др. на базе фрезерного станка с ЧПУ; коленчатых валов на базе круглошлифовального станка; валов на базе токарно-винторезного станка (рис.4) и т.п.

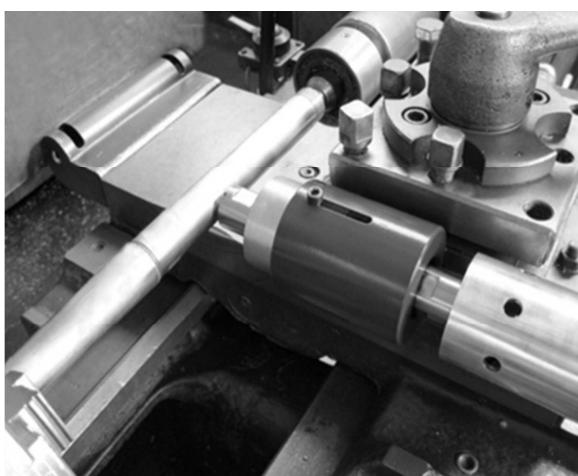


Рис. 4. Устройство для ультразвуковой поверхностной обработки

Поверхностная ультразвуковая обработка является эффективным способом увеличения долговечности, повышения чистоты и точности изделий, различных по конструкции, материалу и условиям эксплуатации. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка поверхности деталей заключается в том, что в процессе механической обработки поверхность детали подвергается воздействию рабочей поверхности инструмента (шарик, ролик и др.), колеблющегося с ультразвуковой частотой. Воздействие ультразвуковых колебаний существенным образом влияет на состояние поверхности и поверхностного слоя изделия: а) создаются остаточные сжимающие напряжения; б) уменьшается шероховатость; в) возникает регулярный микрорельеф поверхности; г) возрастает микротвердость поверхности. Разработанное оборудование внедрено на ряде промышленных предприятий.

Проведены исследования ультразвуковой обработки порошковых материалов «карбид вольфрама – оксид кобальта» и «медь – углеродные нанотрубки» по различным режимам. Анализ рентгенограмм и гистограмм распределения частиц по размерам порошков Al, Co, W, Cu в исходном состоянии и после УЗО показал, что интенсивное ультразвуковое воздействие позволяет измельчить агломераты и в незначительной степени частицы вплоть до наноразмеров. Показано, что УЗО порошка Al приводит к возникновению новых фаз, обусловленных, скорее всего, окислением. Можно констатировать, что оптимальной является УЗО в кавитационном режиме при повышенных гидростатических давлениях. Установлено, что наложение ультразвуковых колебаний в процессе компактирования порошковых материалов незначительно увеличивает плотность синтезированного материала, приводит к увеличению его твердости при концентрациях углеродных нанотрубок в композите до 1 вес.%.

Исследовано влияние ультразвуковых колебаний на пластические свойства материалов с памятью формы. При температурах вне интервала обратного фазового превращения имеет место акустическое разупрочнение, т.е. снижение напряжения течения материала. При воздействии ультразвуковых колебаний в области обратимого перехода из кубической (B2) в ромбоздрическую (R) фазу, в начальный момент за счет силовой составляющей УЗК следовало незначительное снижение напряжения течения, а затем в результате действия тепловой составляющей – его рост (рис. 5).

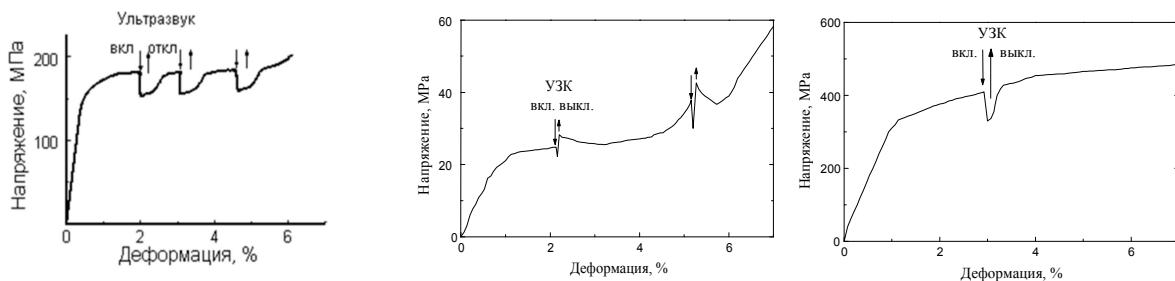


Рис. 5. Диаграммы растяжения Ti-50,8 ат.% Ni проволоки, включающие импульсное воздействие ультразвука ( $A_h=17^{\circ}\text{C}$ ,  $A_k=22^{\circ}\text{C}$ ,  $M_h=33^{\circ}\text{C}$ ,  $M_k=55^{\circ}\text{C}$ ,  $M_k=10^{\circ}\text{C}$ ), амплитуда УЗК - 5 мкм

Предложено использовать ультразвуковое воздействие как метод управления поведением термомеханического привода с односторонним доступом к рабочему элементу из композита сплав TiNi/упругий элемент, в которых упругие элементы могут быть изготовлены из сплава Вт6, сплава TiNi или из бериллиевой бронзы и использоваться как активные элементы термоприводов многократного действия.

Разработан способ получения неорганических материалов с улучшенными физико-механическими свойствами путем воздействия УЗК на процесс СВС. Установлено, что наложение УЗК на процесс СВС приводит к изменениям характеристик процесса горения (скорости и максимальной температуры), и параметров кристаллических решеток тугоплавких соединений на основе титана для всех исследованных систем, различающихся количеством фаз в конечном продукте – от моно- до многофазных структур.

В ИТА НАН Беларуси также проводятся исследования по диспергированию и эмульгированию различных веществ, объемному наноструктурированию и синтезу материалов с применением ультразвуковых колебаний.

# **УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Хмелев В.Н., Кузовников Ю.М., Хмелев М.В.**

*ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», г. Бийск*

*ФГБОУ ВО «Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова»,  
г. Бийск  
vnh@btu.secna.ru*

Современные производства требуют все больше ультразвуковых (УЗ) аппаратов для интенсификации различных технологических процессов [1]. Однако, насыщение производств оборудованием и активное его использование часто ограничивается отсутствием специализированных аппаратов для проведения исследований по выявлению оптимальных режимов (амплитуды, частоты, интенсивности) и условий (объемов, времени, температуры, давления и т.п.) воздействия на разнообразные (по плотности, кавитационной прочности, вязкости, дисперсности и т.п.) среды при реализации конкретных технологических процессов [2]. Поэтому, актуальной задачей для исследователей и производителей оборудования является работа в следующих направлениях:

1. *Обеспечение различных значений частоты ультразвукового воздействия* - параметра, играющего важную роль при исследовании различных процессов. Диапазон рабочих частот аппаратов для исследования большинства процессов составляет от 18 до 130 кГц. Частота определяет УЗ распыление жидкостей, поскольку увеличение частоты позволяет уменьшать размер формируемых частиц [3]. Варьируя значение частоты от 22 до 130 кГц можно получать капли со средним размером от 65 до 18 мкм. Увеличение частоты повышает эффективность разделения эмульсий и дисперсий на компоненты, а при очистке изделий уменьшает степень разрушений очищаемого изделия. Однако, при увеличении частоты распыления от 22 до 130 кГц производительность уменьшается в 100 раз, а увеличение частоты от 22 до 44 кГц снижает эффективность диспергирования в воде в 10 раз. Исключением является сварка полимерных термопластов, при котором поглощение энергии колебаний (движущий фактор процесса) растет с ростом частоты [4]. Реально возможным средством обеспечения разных значений частоты воздействия является выполнение пьезопреобразователей и колебательных систем многочастотными;

2. *Формирование УЗ колебаний различной интенсивности* влияет на эффективность практически всех процессов в жидкостях и жидкофазных дисперсиях, поскольку определяет возникновение и степень активности кавитации. Увеличение интенсивности обеспечивается за счет использования специальных колебательных систем с многополуволновыми концентраторами с большими коэффициентами усиления, а плавное изменение этого значения обеспечивается электронным генератором. Высокое значение интенсивности создается инструментами с малой поверхностью излучения (диаметр рабочего инструмента до 10–15 мм), что обуславливает возможность обработки высоковязких дисперсий в объемах не более 0,1-0,2 л [5];

3. *Создание рабочих инструментов определенной формы и размера*, обеспечивающих введение требуемой энергии колебаний в обрабатываемые среды. Сегодня это резонансные или нерезонансные сменные инструменты цилиндрической или прямоугольной формы с торцевой излучающей поверхностью или сменные инструменты «грибкового» типа. При площади излучающей поверхности от 10  $\text{мм}^2$  до 50  $\text{см}^2$  можно эффективно обрабатывать объемы от 5 мл до 5 л. Рабочие инструменты в форме многополуволновых титановых стержней ступенчато переменного диаметра длиной более 1 м при диаметре 70 мм позволяют обрабатывать объемы от 5 до 1000 л [6];

4. *Обеспечение режима ультразвукового воздействия* для реализации иногда абсолютно противоположных по характеру процессов [7]. Так, разрушение суспензий и эмульсий требует докавитационного режима воздействия, а эффективность для разных по

степени устойчивых дисперсий различна для разных частот УЗ (от 20 до 100 кГц). Режимы, исключающие возникновение кавитации реализуются на частотах от 20 до 100 кГц, за счет регулирования мощности электронного генератора в аппаратах с развитой излучающей поверхностью, увеличения поверхности излучения или применения тонких металлических рубашек вокруг излучателей, исключающих возникновение кавитации в смежном обрабатываемом объеме [8]. В случае УЗ воздействия на газовые дисперсии при воздухоочистке, коагуляции частиц при осаждении туманов, выбросов опасных аэрозолей, пеногашении и сушке материалов применяются пьезоэлектрические преобразователи продольных колебаний [9] и изгибо колеблющиеся дисковые излучатели ступенчато переменной толщины диаметром от 100 до 400 мм, обеспечивающие интенсивность воздействия менее 160 дБ ( $1 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ) [10]. Избыточность интенсивности, приводящая к разрушению сконгелированных частиц, может преодолеваться импульсным воздействием. Стабильность режима воздействия обеспечивается применением систем поддержания рабочей частоты и автоматической стабилизации амплитуды колебаний рабочего инструмента при влиянии внутренних процессов в системе, а также внешних факторов;

5. *Реализация контроля параметров УЗ воздействия* для выявления оптимальных режимов и условий воздействия при отработке новых технологий путем применением специализированных объемов, обеспечивающих визуальное наблюдение, измерением амплитуды колебаний излучающих поверхностей, измерениями кавитационной прочности различных материалов, возможностями сравнения воздействий от нескольких систем различной мощности и конструктивного исполнения [11]. Это позволяет определять оптимальные частоты, интенсивности и энергетические режимы воздействия при проведении научных исследований по созданию новых технологий и материалов;

6. *Создание технологической оснастки УЗ оборудования* определяет эффективность, а иногда и принципиальную возможность реализации тех или иных процессов. Замкнутые технологические объемы для обеспечения периодического и непрерывного режимов обработки позволяют подобрать и ограничить область вокруг рабочего инструмента для обеспечения мощностных и временных параметров, а также однородности воздействия. Именно этим определяется производительность оборудования. Вместимость технологического объема может быть увеличена при высокой мощности УЗ аппарата при том же времени периодической обработки, или при той же скорости протока с увеличением времени озвучивания. Вводимую объемную энергию можно увеличить размещением в объемах нескольких излучателей, а время обработки, соединяя технологические объемы последовательно. Для устранения избыточного нагрева обрабатываемой среды, технологические объемы снабжаются рубашками охлаждения. Для избегания предельно допустимого нагрева пьезопреобразователей (температура Кюри около  $300^\circ\text{C}$ ) применяются системы тепловой отсечки в виде проточных технологических объемов между преобразователем и рабочим инструментом, а также осуществляется замена воздушного охлаждения жидкостным. Для обработки сред при пониженных или повышенных давлениях излучатели снабжаются промежуточными звенями (бустерами) между преобразователем и концентратором, со специальным фланцем для крепления в установки с давлением до 2 МПа. Коэффициент усиления сборки выбирается таким, чтобы обеспечивать интенсивность до  $100 \text{ Вт}/\text{см}^2$ . Для агрессивных условий элементы излучателя выполняются из коррозионностойких материалов – титана, специальных сталей, стекла. Изнашиваемые инструменты делаются сменными;

7. *Расширение функциональных возможностей УЗ аппаратов* необходимо для исследования различных процессов в разнообразных условиях не снижая эффективности реализации каждой конкретной задачи. Наиболее приемлемые способы: комплектация УЗ аппаратов наборами различных по форме, длине и размерам рабочими инструментами, оснащение дополнительными технологическими объемами, подставками, креплениями и штативами. Кроме этого, для расширения функциональных возможностей используются аппараты с несколькими колебательными системами, реализующими различные процессы.

**8. Использование автоматизированного управления УЗ аппаратами** помимо выбора и стабилизации [12] режимов УЗ обработки позволяет реализовать функции контроля параметров и сбора данных с использованием персонального компьютера и панелей управления.

### Литература

1. Хмелев, В.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография [Текст] / 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. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин. – Бийск, Изд-во АлтГТУ, 2007. – 400 с.
3. Хмелев, В.Н. Ультразвук. Распыление жидкостей [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов А.В. Шалунова. – Бийск: Изд-во Региональное отделение Алтайского края Общероссийской общественной организации писателей «Общероссийское литературное сообщество», 2017. – 271 с.
4. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая сварка термопластичных материалов [Текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов, С.С. Хмелёв. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 281 с.
5. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та, 1999. – 120 с.
6. Хмелев, В.Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции [Текст] / Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Цыганок С.Н., Левин С.В. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 196 с.
7. Пат. 141803 Российская Федерация, МПК B06B 1/06. Аппарат ультразвуковой проточной обработки [Текст] / Хмелев В.Н., Левин С.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н., Кузовников Ю.М.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Центр ультразвуковых технологий». – № 2014107436/28; заявл. 26.02.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16. – 2 с.: ил.
8. Пат. 2471571 Российская Федерация, МПК B06B 1/06. Ультразвуковая колебательная система [Текст] / Хмелев В.Н., Кузовников Ю.М., Цыганок С.Н., Левин С.В., Хмелёв С.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ». – № 2011133748/28; заявл. 10.08.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 2. – 8 с.: ил.
9. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей [Текст] / 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.
10. Пат. 132000 Российская Федерация, МПК B06B 1/00. Ультразвуковая колебательная система для газовых сред [Текст] / Хмелев В.Н., Галахов А.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Голых Р.Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ». – № 2013123940/28; заявл. 24.05.2013; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 2 с.: ил.
11. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые технологические аппараты – как эффективный инструмент создания новых технологий и материалов [Текст] / Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелев М.В. – Витебск: Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы, ВГТУ, 2016. – С. 16-19.
12. Хмелев В.Н. Принципы построения и пути развития электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов [Текст] / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В. – Витебск: Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы, ВГТУ, 2016. – С. 77-79.

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ, ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД И ГРУНТОВ

Муллакаев М.С., Абрамов В.О.

Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва  
mullakaev@mail.ru

Ультразвук (УЗ) является экологически безопасным средством повышения эффективности технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства. УЗ воздействует на кинетику химических реакций и обеспечивает стимуляцию тепло-массообменных процессов, способствует увеличению производительности технических систем, снижению их энергоёмкости и повышению качества продукции [1-3].

Для восстановления продуктивности низкодебитных скважин разработан УЗ автоматизированный скважинный комплекс, в состав которого входит: скважинные УЗ модули на основе пьезокерамических и магнитострикционных преобразователей, автоматизированное рабочее место (АРМ) управления комплексом, комплект эксплуатационной (ЭД) и технологической документации (ТД) по режимам и параметрам обработки призабойной зоны скважины (ПЗС) [1-5].

Комплекс обеспечивает последовательную комбинированную обработку ПЗС в автоматизированном режиме с заданными рациональными и технологическими параметрами сонохимической обработки. В результате УЗ обработки (УЗО) происходит декольматация каналов пористой среды от отложений парафинов, асфальтенов и других загрязнений, снижение вязкости флюида, изменение смачиваемости на границе раздела сред, увеличение скорости фильтрации и др.

Результаты опытно-промышленных испытаний (ОПИ) комплекса показали, что средний прирост дебита после УЗО составил 4,4 т/сут для Западной Сибири и 10,2 т/сут для Самарской области (рис. 1).

Эксперименты по УЗО на реологические свойства 11 нефтий с различным групповым составом и физико-химическими свойствами показали, что эффективность воздействия зависит от группового состава нефти и времени обработки [1,2,6]:

- УЗО малопарафинистых нефтей с высоким содержанием смол и асфальтенов приводит к существенному снижению вязкости и температуры застывания; эффективность воздействия растёт с увеличением времени обработки.
- для нефтей с высоким содержанием *n*-алканов УЗО неэффективна, что обусловлено интенсификацией кристаллизации высокомолекулярных *n*-алканов.

Совместная обработка УЗ и химическими реагентами более эффективна, поскольку нелинейные акустические эффекты способствуют равномерному распространению реагентов по всему объёму и препятствуют обратному построению надмолекулярных образований [6].

На основе расчёта гидродинамического излучателя, создана пилотная установка для кавитационной обработки нефти, аппаратурно-технологическая схема (АТС) которой представлена на рис. 2.

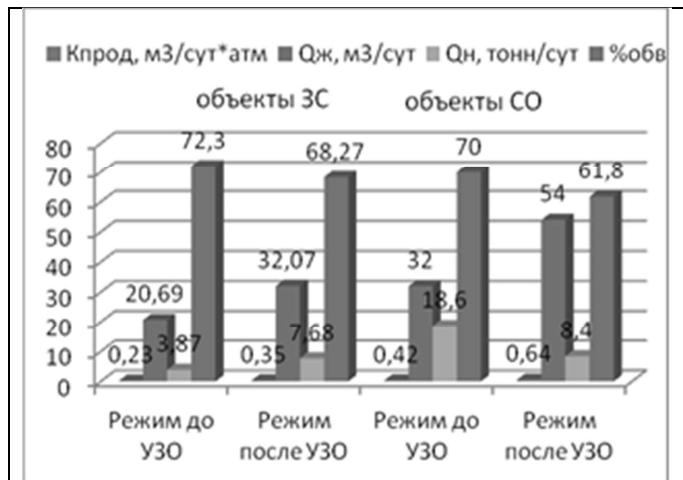


Рис. 1. Влияние УЗО на параметры работы скважины с учетом отработанного времени

ОПИ установки на опытном заводе ОАО ВНИИ НП (г. Москва) показали, что комбинированная обработка УЗ и реагентами приводит к снижению динамической вязкости Лузановской нефти в среднем в 1,7...2 раза, снижению температуры застывания нефти на 6-8 °C.

Основная идея использования УЗ для интенсификации очистки нефтезагрязненных вод заключалась в создании технологии, позволяющей использовать УЗ технику только для активации небольших объемов химических реагентов в узлах их подготовки, что позволяет при повышении степени очистки значительно сократить капитальные и эксплуатационные расходы [3, 7, 8].

Гистограмма на рис. 3 наглядно иллюстрирует тенденции и качественную картину эффективности УЗ воздействия при реагентной флотации нефтезагрязненных вод при совместном использовании двух реагентов – коагулянта (Аква-Аурат А 30, 10 мг/л) и флокулянта («Праестол» 857, 2 мг/л).



Рис. 4. УЗ гальванокоагуляционной комплекс очистки загрязнённых вод позволяет в 2-3 раза сократить количество используемого реагента, а значит и количество получаемого осадка.

Таблица 1 - Результаты очистки сточных вод депо «Невское».

Вид загрязнения	До очистки, мг/л	После очистки, мг/л	Степень очистки, %
Нефтепродукты	223,5±22,35	0,10±0,04	99,95
Железо общее	1326±198	7,69±1,69	99,42
Медь	0,5240±0,1468	0,0206±0,0059	96,07
Цинк	25,58±3,58	<0,004	>99,98
Марганец	7,60±1,29	0,405±0,101	94,67

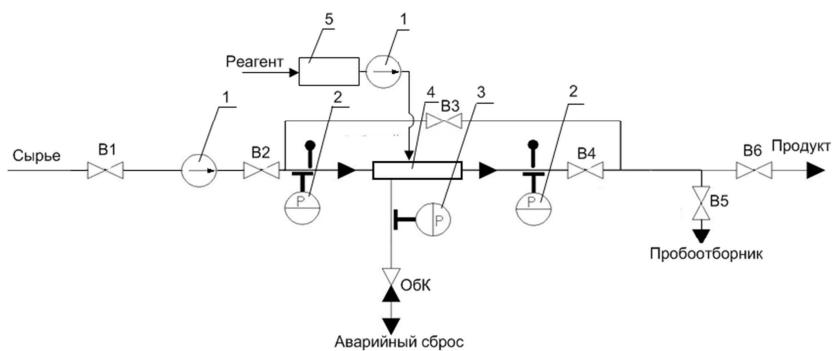


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема гидродинамический проточная установки: 1 – насос, 2 - манометр, 3 - моновакууметр, 4 – гидродинамический кавитационной модуль, 5 – блок предварительной УЗ - активации реагента.

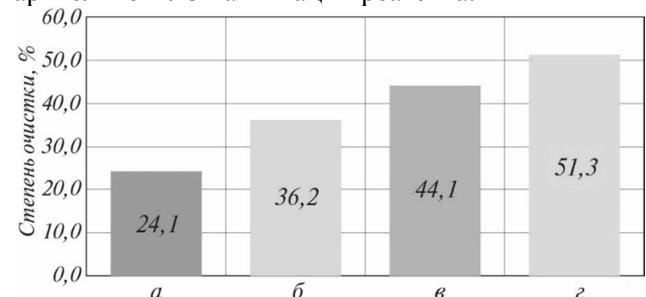


Рис. 3. Повышение эффективности применения Аква-Аурата 30 и Праестола 857 при их совместном использовании и предварительной УЗ активации (УЗА): а – Аква-Аурат А30; б – Аква-Аурат А30 и Праестол 857; в – то же, Праестол подвергался УЗА в течение 10 с; г – то же, Аква-Аурат А30 подвергался УЗА в течение 30 с, а Праестол в течение 10 с

Экспериментально выявленное существенное повышение активности наработанных в гальванокоагуляторе кристаллов при УЗ воздействии позволило разработать новую технологию УЗ гальванокоагуляционной очистки загрязнённых вод в специальных реакторах.

На основе этого разработан мобильный УЗ комплекс сорбционной очистки загрязненных вод (рис. 4), основные показатели работы которого приведены табл. 1. Несомненным преимуществом технологии предварительной УЗ активации гальванокоагулянта заключается в том, что она

значит и количество получаемого осадка.

В последние годы УЗ активно используется для извлечения нефтепродуктов из нефтеносных песков и очистки нефтезагрязненных почв [3,9]. Разработан пилотный стенд переработки нефтешламов и нефтезагрязненных грунтов, оснащённый УЗ техникой промышленного масштаба, АТС, которого представлена на рис. 5. Испытания пилотного стенда проведены на образцах нефтезагрязненного грунта площадки Приволжского филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Уралнефтепродукт» (г. Самара). Показатели очистки указаны в табл. 3.

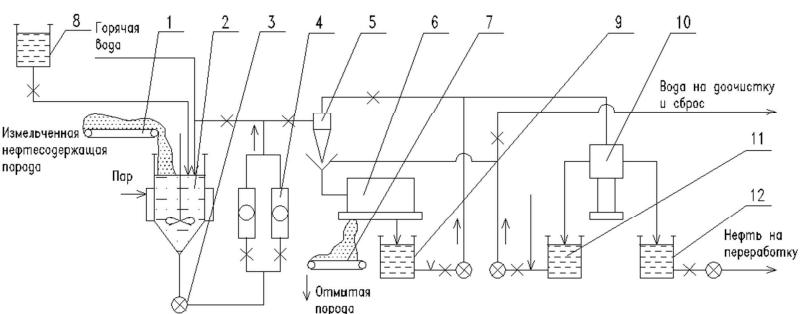


Рис. 5. АТС переработки нефтесодержащих грунтов с использованием УЗ техники: 1 – транспортер нефтесодержащей породы, 2 – смеситель, 3 – насосный блок, 4 – УЗ реактор, 5 – гидроциклон, 6 – центрифуга, 7 – транспортер отмытой породы, 8 – ёмкость химического реагента, 9 – сборник промывного фугата, 10 – сепаратор, 11 – сборник очищенной воды, 12 – сборник нефтепродуктов

Таблица 3 - Результаты очистки нефтезагрязненного грунта (без УЗО/после УЗО)

Место обработки	Поток	Масса компонентов, кг		
		Твёрдые вещества	Нефтепродукты	Вода
После гидроциклиона	Концентрат	33,8/31,8	2,3/2,2	62,4/62,7
	Осветлённый поток	0,4/1,3	6,9/8,7	187,6/187,3
После центрифуги	Осадок	29,1/28,3	4,5/3,0	8,7/8,5
	Фугат	1,9,1,8	0,7/0,4	165,8/166,1
После сепаратора	Осадок	2,3/3,1	0,8/0,9	0,9/1,0
	Фугат	-	6,9/8,2	352,5/352,4

#### Литература

1. Муллахаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов: дис. д-ра техн. наук. Московский государственный университет инженерной экологии. М.: 2011. 391 с.
2. Муллахаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. 168 с.
3. Абрамов В.О., Муллахаев М.С., Векслер Г.Б. Восстановление продуктивности нефтяных пластов и очистка загрязненных вод с использованием ультразвукового воздействия - М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2015. 212 с.
4. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. Vol. 125. P. 1-8.
5. Abramov V. O., Mullakaev M.S, Abramova A.V., Esipov I.B., Saltikov Y.A., Mason T.J. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20. P. 1289-1295.
6. Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015. Vol. 49. № 3. P. 287-296.
7. Abramov O.V., Abramov V.O., Veksler G.B., Kulov N.N., Zabotina E.V., Kashirskaya O.A., Shkolnikov A.V., Mullakaev M.S. Ultrasonic activation of reagent purification of surface wastewaters from oil products // Theoretical foundations of chemical engineering. 2009. Vol. 43. P. 568-574.
8. Abramov V. O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S, Vexler G.B., Mason T.J. Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21. P. 812-818.
9. Abramov O.V., Abramov V.O., Myasnikov S.K., Mullakaev M.S. Extraction of bitumen, crude oil and its products from tar sand and contaminated sandy soil under effect of ultrasound // Ultrasonics Sonochemistry. 2009. Vol. 16. P. 408-416.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЩНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ В ПРОЦЕССАХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Клубович В.В.<sup>1</sup>, Кулак М.М.<sup>1</sup>, Хина Б.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск

<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск

[mmk\\_vit@mail.ru](mailto:mmk_vit@mail.ru)

Получение новых материалов энерго- и ресурсосберегающим методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), или синтеза горением, получило широкое применение. Уникальность СВС состоит в том, что если при традиционном печном синтезе для полного превращения реагентов в продукты требуется время ~1-10 ч, то при СВС оно достигается за несколько секунд. В волне СВС достигаются экстремальные условия: высокая температура – до 4000 К, большая скорость нагрева – до  $10^5$  К/с, и резкий градиент температуры. В силу этого в ней реализуются необычные с точки зрения традиционного физического материаловедения механизмы фазо- и структурообразования. Продукты СВС обычно обладают высокой чистотой и мелкозернистой структурой, что определяет уникальные свойства материалов [1].

Однако СВС-процессам присущ ряд ограничений: они протекают в относительно узкой области параметров (состав шихты, плотность образца и др.) и плохо поддаются управлению после инициирования. Кроме того, характеристики СВС-процессов, такие как скорость и температура горения, а также структура и свойства продуктов определяются множеством факторов, например, состав шихты, размер порошковых частиц и наличие примесей, размер шихтового брикета, исходная пористость, давление окружающей газовой среды, начальная температура шихты и др.

В связи с необходимостью создания новых функциональных СВС-материалов и развитием новых технологий, в том числе аддитивных с использованием реакционно-способных порошков, возникает проблема разработки контролируемых СВС-процессов. Использование традиционных методик, таких как изменение внешнего давления, состава шихты и ее подогрев, бывает ограничено – например, в силу слабой зависимости реакции от давления или определенных требований, предъявляемых к составу смеси.

Для решения указанной проблемы большие возможности может дать применение физических полей, зарекомендовавших себя в практике горения порохов и ракетных топлив, литья сплавов, спекания порошков и в других процессах. Весьма перспективным методом внешнего воздействия на процесс СВС являются мощные ультразвуковые колебания (УЗК) [2]. Однако большинство работ по СВС в условиях внешнего воздействия, например, наложение магнитного поля [3] и УЗК [4], посвящены исследованию влияния этого фактора, в основном, на параметры волны горения (скорость, температуру, концентрационные пределы) и значительно меньше внимания уделялось изучению изменений структуры и фазового состава продукта при внешнем воздействии.

Наиболее перспективным направлением исследований является анализ материаловедческих аспектов воздействия внешних полей на СВС ибо оно может дать как ценную научную информацию, так и показать пути создания *in-situ* контролируемых СВС-процессов. В частности, ранее нами исследовано влияние УЗК на СВС в системе Ti-C-Ni-Mo [5, 6], применительно к синтезу кермета типа “TiC – металлическая связка (Ni+Mo)”. Показано, что имеется как тепловое воздействие УЗК на СВС (снижение температуры и скорости горения из-за охлаждения образца вследствие вынужденной конвекции окружающего инертного газа), так и физическое (влияние УЗК на кристаллизацию зерен продукта из кратковременно существующего металлического расплава в волне горения). Установлено, что существует оптимальная амплитуда УЗК, обеспечивающая формирование структуры, которая благоприятна для инструментальных материалов: мелкие зерна TiC

однородного размера в металлической матрице.

В данной работе изучены материаловедческие аспекты влияния УЗК на СВС в классических СВС-системах Ti–C, Ti–Si и Ti–B. Выбор систем мотивирован тем, что в них изменяется число равновесных соединений, которые могут образоваться в процессе СВС: монофазные системы Ti–Cx и многофазные: система Ti–Si (основные фазы –  $Ti_5Si_3$ ,  $TiSi$ ,  $TiSi_2$ ) и система Ti–B ( $Ti_2B$ ,  $TiB$ ,  $Ti_3B_4$ ,  $TiB_2$ ,  $Ti_2B_5$ ). В связи с этим можно ожидать, что при наложении УЗК на СВС изменится соотношение фаз в продукте из-за физического воздействия мощного ультразвука на процессы конкурирующего зародышебразования и роста твердых фаз из высокотемпературного расплава на основе титана, существующего короткое время в волне СВС.

Использовали порошки полидисперсного титана марки ПТМ с размером частиц менее 100 мкм и марки ПТОМ с размером частиц менее 50 мкм, полупроводникового кремния марки КПС–3 с размером частиц менее 63 мкм, бор аморфный (удельная поверхность  $16,5 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и ламповую сажу марки ПМ-16Э с размером частиц менее 1 мкм. СВС с наложением УЗК проводили на установке собственной конструкции по методике подготовки образцов, описанной в работе [7].

Экспериментально исследовали взаимодействие УЗК с исходными образцами систем Ti– $\beta$ (C, Si, B), где  $\beta$  – стехиометрический коэффициент, методом термографического анализа при варьировании мольного соотношения компонентов  $\beta$ , степени теплоизоляции образцов от окружающей газовой среды (аргон) при давлении 1 МПа и разных амплитудах УЗК. На основании полученных экспериментальных данных были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  для исследуемых систем и показано, что наложение УЗК приводит к увеличению  $\alpha$  из-за вынужденной конвекции газа.

Установлено, что наложение УЗК на процесс СВС приводит к изменениям характеристик горения (скорости и максимальной температуры), а также параметров кристаллических решеток тугоплавких соединений на основе титана для всех исследованных систем. Температура и скорость горения при наложении ультразвуковых колебаний уменьшаются, что может быть связано с тепловыми факторами – изменением условий теплообмена с окружающей средой при высокочастотной вибрации образца. Однако мы не можем исключить физического (нетеплового) эффекта, поскольку ультразвук может влиять на температуру и скорость горения опосредованно – за счет воздействия на кинетику гетерогенного взаимодействия, что может привести к изменению фазового состава конечного продукта и, соответственно, тепловыделения реакций. Для анализа роли этого фактора были выполнены рентгеновские и микроструктурные исследования. Рентгенофазовый анализ (РФА) показал, что наложение УЗК на процесс СВС в системе титан–углерод приводит к увеличению периода кристаллической решетки карбida титана, что указывает на возрастание степени насыщенности карбida титана углеродом, т.е. растет полнота реагирования: доля связанного углерода увеличилась до 19,28% масс., что близко к стехиометрии  $TiC_{1,0}$ .

В многофазных системах Ti–Si и Ti–B методом РФА исследовано изменение фазового состава и параметров кристаллических решеток синтезированных фаз при различных соотношениях исходных компонентов и амплитудах УЗК. Как известно, волна СВС состоит из трех характерных зон: зона прогрева шихты (зона Михельсона), зона быстрой реакции и зона дореагирования, в которой формируется конечная структура.

Для выявления зон волны СВС, в которых УЗК оказывает наибольшее влияние на образование конечного продукта, проведен следующий эксперимент для системы с многофазным конечным продуктом Ti–0,6Si: 1) включали ультразвук одновременно с инициированием СВС и выключали сразу после прохождения волны СВС по образцу, т.е. воздействовали на все зоны волны горения, 2) УЗК накладывали после прохождения волны горения по образцу, т.е. влияли только на зону дореагирования, и 3) УЗК включали одновременно с поджигом и выключали после остывания образца, т.е. объединяли случаи 1 и 2. После синтеза на основе данных РСА рассчитывали объем элементарной ячейки (ОЭЯ) фазы-продукта ( $Ti_5Si_3$ ). В данной системе при СВС без УЗК в продукте наблюдается небольшое количество фазы  $TiSi_2$ , которая исчезает при СВС с УЗК.

В первом случае (при воздействии УЗК во время прохождения волны СВС) наблюдалась снижение скорости и температуры горения и уменьшение ОЭЯ. Вероятно, это связано с ускоренной диффузией в местах контакта твердых частиц Ti–Si и формированием промежуточных фаз в зоне прогрева, что приводит к снижению тепловыделения в зоне быстрой реакции волны СВС. Кроме того, при наложении УЗК увеличивается теплоотдача с поверхности образца, интенсифицируется выделение адсорбированных на поверхности частиц и растворенных в исходном титане газов, что приводит к уменьшению плотности образцов и ухудшению контакта реагентов. В результате такого воздействия ультразвука происходит снижение ОЭЯ фазы  $Ti_5Si_3$ .

Во втором случае (воздействие УЗК только на зону догорания) наблюдается увеличение ОЭЯ фазы  $Ti_5Si_3$ , что может быть связано с ускорением массопереноса в расплаве Ti–Si, присутствующем в зоне догорания, и воздействием УЗК на окончательное структурообразование продукта (коалесценция зерен и завершение кристаллизации). В третьем случае эффекты, имеющие место в 1-м и 2-м случаях, суммируются, и ОЭЯ увеличивается в меньшей степени, чем в случае 2; при этом доминирует влияние УЗК на процессы в зоне догорания.

Для системы титан-кремний применение ультразвуковых колебаний в процессе СВС приводит к изменению соотношения фаз в продукте и к получению более гомогенной структуры: однородному распределению фазовых составляющих и пор по объему образца. Так, для состава Ti–0,8Si увеличивается количество фазы  $Ti_5Si_3$  и уменьшается содержание фазы  $TiSi_2$ , а для состава Ti–1,0Si увеличивается количество фазы  $TiSi_2$  и уменьшается содержание фазы  $Ti_5Si_3$ .

Для многофазной системы титан-бор для всех исследованных мольных соотношений реагентов  $\beta=0,75 - 2,25$  наложение УЗК во время синтеза приводит к изменению фазового состава продуктов синтеза, увеличивается содержание фазы  $TiB_2$ .

В результате проведенных исследований установлено, что воздействие ультразвуковых колебаний на СВС-процесс является эффективным физическим методом целенаправленного управления фазовым составом и структурой продуктов синтеза, что открывает перспективу создания контролируемых СВС-технологий получения новых материалов различного назначения путем подстройки микроструктуры получаемого продукта под конкретную функцию материала.

#### Литература

1. Мержанов А.Г., Мукасьян А.С. Твердопламенное горение. М.: Торус Пресс, 2007. 336 с.
2. Левашов Е.А., Мержанов А.Г., Хавский Н.Н. Перспективы применения акустических полей в технологиях СВС // ИФЖ. 1993. Т. 65, № 4. С. 503-506.
3. Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М., Мержанов А.Г. Влияние магнитного поля на горение гетерогенных систем с конденсированными продуктами реакции // ФГВ. 1986. Т. 22. № 6. С. 65-72.
4. Мальцев В.М., Селезнев В.А., Писковский С.В. Особенности горения системы титан-углерод в ультразвуковом поле // Хим. физика. 1984. Т. 3, № 12. С. 1750-1754.
5. Khina B.B., Kulak M.M. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC-metal binder” // J. Alloys & Compounds. 2013. V. 578. P. 595-601.
6. Khina B.B., Kulak M.M., Levashov E.A., Maksimov Y.M. Ultrasonic field impact on SHS / Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis: History, Theory, Technology, and Products, ed. by I. Borovinskaya, A. Gromov, E. Levashov, Y. Maksimov, A. Mukasyan, A. Rogachev. Amsterdam: Elsevier, 2017. P. 411-413.
7. Клубович В.В., Кулак М.М., Хина Б.Б. Ультразвук в процессах СВС. – Мн.: БНТУ, 2006. – 279 с.

# ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВЕРХСТРУКТУР

Классен Н.В.<sup>1</sup>, Кобелев Н.П.<sup>1</sup>, Колыванов Е.Л.<sup>1</sup>, Мышляев М.М.<sup>1,2</sup>,  
Клубович В.В.<sup>3,4</sup>, Кулак М.М.<sup>3</sup>, Покидов А.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт технической акустики НАНБ, Витебск, Беларусь

<sup>4</sup>БНТУ, Минск, Беларусь

klassen@issp.ac.ru

В последние годы происходит активное расширение исследований по образованию, структуре и свойствам наноразмерных и микромасштабных сверхструктур. Это продиктовано быстро растущими потребностями новой техники для оптоэлектроники, альтернативной энергетики, биосенсорики, медицинской диагностики и терапии, дефектоскопии и т.д. В большинстве случаев такого рода изделия формируются технически сложными процессами с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии, электронно-лучевой литографии и других дорогостоящих методик. Однако наши исследования по самоорганизующемуся модифицированию морфологии конденсированных сред ультразвуковыми, деформационными, электрическими, лазерными воздействиями показали, что существует обширное поле возможностей для образования сверхструктур технически приемлемого качества гораздо более простыми и экономичными способами. Например, пластическое деформирование металлов и полупроводников при определенных условиях создает дислокационные сверхструктуры с высокой степенью наноразмерной периодичности (рис. 1) [1].

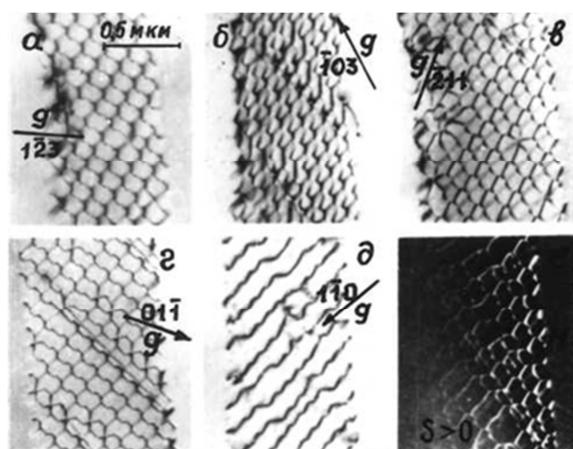


Рис. 1. Электронная микроскопия сетки из дислокаций пяти типов с разными векторами Бюргерса в молибдене [1].

Столь совершенная периодичность дислокационной сетки с малыми расстояниями между дислокациями позволяет предложить новый механизм взаимодействия между ними посредством излучения и поглощения резонансных акустических фононов [2].

Любой из сегментов этой сетки при смещении под действием внешних напряжений должен излучать резонансные акустические колебания, которые тут же будут поглощаться соседними сегментами по причине совпадения их резонансных частот, стимулируя их перемещения. Таким образом, создается взаимосвязанная система из дислокаций и высокочастотных фононов, которую можно представить новым типом возбуждения атомарной решетки подобно тому, как взаимодействие оптических фотонов и находящихся с ними в резонансе электронов создает в полупроводниках и металлах новые типы смешанных светоэлектронных возбуждений – поляритоны и плазмоны соответственно. Их поведение в

кристаллах существенно отличается от исходных и фотонов, и электронов. По аналогии от смешивания дислокаций с фононами естественно ожидать новых акусто-деформационных явлений. Более того, наблюдаемые периоды в десятки нанометров способны индуцировать резонансы и в системах электронов и фотонов. Поэтому на таких дислокационных сверхструктурах можно рассматривать и принципиально новые четырехкомпонентные атомарно-электронно-фотонные возбуждения с множеством новых следствий. Например, могут еще более проясниться механизмы открытого 50 лет назад в ИФТТ РАН фотопластического эффекта (ФПЭ) [3], когда поглощение деформируемым полупроводниковым кристаллом всего лишь милливаттной энергии света индуцирует существенные изменения деформирующего напряжения с изменениями энергозатрат, превышающих энергию поглощенного света в десятки раз. И знак, и величина ФПЭ сильно зависят не только от состава кристалла, но и от типа дислокаций, участвующих в массопереносе при той или иной геометрии деформирования. Например, в сульфидах кадмия при скольжении по базисным плоскостям {0001} знак ФПЭ положителен, т.е. освещение кристалла приводит к его упрочнению, а при скольжении по призматическим плоскостям – отрицателен [4]. Но в кристаллах с решеткой вюрцита, к которым относится сульфид кадмия, дислокации в базисных плоскостях заряжены, а в призматических – нейтральны. Так как заряды дислокаций и других структурных дефектов при генерации светом свободных электронов и дырок хотя бы частично экранируются, это должно приводить к ослаблению торможения дислокаций, т.е. к разупрочнению кристалла. В реальности же при освещении кристалла движение заряженных базисных дислокаций затрудняется (упрочнение), а электрически нейтральных призматических – наоборот, облегчается. Этот кажущийся парадокс разрешается, если считать, что при коллективном движении дислокаций в системах скольжения важную роль играет взаимообмен резонансными фононами. В пьезоэлектрических кристаллах, в том числе и сульфидах кадмия, генерация фононов с уменьшением заряда дислокаций должна слабеть. Это приведет к ослаблению коллективных взаимодействий дислокаций через фононы и, соответственно, к уменьшению стимулирования ими дислокационных перемещений и, соответственно, упрочнению. Заряд же призматических дислокаций за счет захвата неравновесных электронов или дырок локализованными на них состояниями при освещении будет усиливаться. По этой причине усиливаются коллективные резонансные взаимодействия, и движение дислокаций ускорится, т.е. произойдет разупрочнение.

Следует подчеркнуть, что многочисленные экспериментальные факты самоорганизации периодических дислокационных сверхструктур при деформировании кристаллов тоже свидетельствуют в пользу важной роли коллективных взаимодействий между дислокациями через резонансные фононы, т.к. в соответствии с теоремой Пригожина стационарному течению любого динамического процесса соответствует минимум производства энтропии – в частности, минимизация тепловыделения (т.е. трения). При движении дислокаций неизбежно излучаются фононы, что обычно приводит к нагреву кристалла, т.е. дополнительному производству энтропии. Но если система дислокаций высоко периода (как на рис. 1), излучаемые одной дислокацией ее резонансные фононы тут же поглощаются другой, т.к. в периодической сетке дислокаций резонансные частоты их собственных колебаний совпадают по причине одинаковых расстояний между точками закрепления, которыми и определяются резонансные частоты. Поэтому излучение фононов движущимися дислокациями приводит не к нагреву кристалла, а к ускорению движения дислокационной системы как целого.

Высокая периодичность дислокационных сверхструктур, создаваемых активным пластическим деформированием, подтверждается также рядом оптических дифракционных явлений, наблюдавшихся в полупроводниковых кристаллах и аналогичных эффектах рентгеновской дифракции на атомарных решетках кристаллов [5]. Так как масштабы сверхструктур, возникающих при деформировании твердых тел, часто оказываются соизмеримы с длиной волны света, в таких материалах наряду с рентгеноподобной оптической дифракцией наблюдаются и специфические оптические явления – например, усиление и направленность сцинтилляционного излучения в микроволокнах из композитов

неорганических наночастиц и органических люминофоров, полученных методом центрифугирования. В таких микроволокнах за счет быстрого их деформирования при затвердевании возникает модуляция структуры вдоль оси волокна с соответствующей модуляцией показателя преломления. Это, в свою очередь, формирует распределенную обратную связь, за счет чего возбуждаемая ионизирующим излучением люминесценция (т.е. сцинтилляции) усиливается вдоль волокна (что напоминает генерацию света в волоконных лазерах). Еще одно оптическое следствие высокой периодичности сверхструктуры, возникающей при деформировании кристаллов – заметное повышение коэффициента отражения света от металлов, подвергнутых шариковой обкатке [2]. Наблюдаемое ослабление поглощения падающей на поверхность обкатанного металла света в полтора раза можно объяснить возникающей в приповерхностном слое периодичной сверхструктурой нанозерен, на которой образуемые светом в приповерхностном слое плазмоны резонируют, вызывая усиление поля отраженной волны.

Другие важные проявления высокой периодичности формирования шариковой обкаткой металлов периодических наноструктур – повышение антакоррозионной стойкости обкатанной поверхности и кажущееся смягчение упругих модулей. Заметное замедление окисления и других химических реакций на обкатанных поверхностях, помимо понятного улучшения гладкости (приводящего к устранению шероховатостей, инициирующих реакции захватом инородных молекул) можно объяснить еще и метастабильным минимумом энергии периодической наноструктуры, сформированной обкаткой. При малости ее периодов внедрение в нее окислов или других инородных соединений приведет к заметному повышению энергии, что и будет тормозить эти реакции. С другой стороны, пластическое изменение периодичности внешними напряжениями также будет повышать внутреннюю энергию и система будет стремиться вернуться к исходной сверхструктуре, создавая впечатление упругой обратимости (хотя имел место пластический массоперенос с соответствующими энергозатратами).

Эта работа частично поддерживалась грантами РФФИ №№ 16-58-00132, 16-29-00132 и грантом БФФИ № Т16Р-190.

## Литература

1. Глебовский В.Г., Копецкий Ч.В., Мышляев М.М., Романов Ю.А. Стационарная ползучесть и дислокационная структура молибдена // ФММ, 1976, т.41, в.3, с.621-629.
2. Классен Н.В., Клубович В.В.. Кулак М.М., Мышляев М.М. Особенности наноструктур, самоорганизующихся при деформационных и электромагнитных воздействиях. В книге «Перспективные материалы и технологии», под ред. В.В. Клубовича, т. 2, гл. 11, с. 214-229, Витебск, Беларусь. 2017.
3. Осипьян Ю.А., Савченко И.Б. Экспериментальное наблюдение влияния света на пластическую деформацию сульфида кадмия // Письма ЖЭТФ, 1968, т. 130, с. 7-12.
4. Классен Н.В., Осипьян Ю.А., Шихсаидов М.Ш., Одновременные исследования фотопроводимости и фотопластического эффекта на монокристаллах CdS и ZnSe // ФТТ, 1976, т. 18, в. 6, с. 1587-1594.
5. Емелин В.Я., Классен Н.В., Осипьян Ю.А., Дифракция и аномальное прохождение света в пластически деформированном сульфиде кадмия// Письма ЖЭТФ, 1981, т. 33, с. 329-332.

# КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ

Хмелев В.Н.<sup>1</sup>, Барсуков Р.В.<sup>1</sup>, Ильченко Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Бийский технологический институт, Бийск

<sup>2</sup>ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск

roman@btsecna.ru

Применение ультразвуковых (УЗ) технологий в различных отраслях промышленности обеспечило новый уровень развития многих производств. Уже давно известны и широко используются преимущества применения ультразвуковых воздействий для сварки металлов и термопластов, изменения структуры и свойств жидкно – дисперсных сред при диспергировании, очистке, экстракции и получении эмульсий, при размерной обработке твердых и хрупких материалов. УЗ технологии прочно заняли свою нишу в медицине, пищевой промышленности, сельском хозяйстве и даже в быту.

Высокая эффективность применения УЗ энергии, с одной стороны, и недостаточный объем теоретических исследований УЗ процессов, с другой стороны, в большинстве случаев обуславливают недостаточное внимание к вопросам оптимизации параметров УЗ воздействий и сдерживают развитие УЗ оборудования в целом. В большинстве случаев потребители УЗ установок довольствуются относительно примитивными УЗ установками, представляющими собой электронный генератор, определенной мощности и излучатель. При этом пользователю УЗ оборудованием дается возможность вручную корректировать параметры УЗ излучения (мощность, время воздействия, частота), устанавливая их интуитивно, что далеко не всегда является оптимальным вариантом.

Несмотря на это, в ряде работ [1] приводятся результаты исследований, показывающих, что оптимизация УЗ воздействий при реализации различных технологических процессов, протекающих в мощных ультразвуковых полях, возможна только при непрерывном контроле параметров реализуемых процессов и параметров УЗ воздействия. Поэтому дальнейшее развитие УЗ оборудования возможно только путем интеграции в него систем контроля технологических процессов и явлений, протекающих в УЗ полях.

Перспективным направлением развития УЗ аппаратов является интеграция в их структуру систем контроля, где в качестве чувствительного элемента используется ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) [2], параметры которых, в некоторых случаях, сильно зависят от свойств обрабатываемых сред и процессов, протекающих в них.

Контроль параметров УЗКС позволяет косвенным образом контролировать процессы и явления, протекающие в подвергаемых УЗ воздействию средах без применения дополнительных датчиков и чувствительных элементов. Параметрами и характеристиками УЗКС являются: резонансная частота, добротность, напряжение на электромеханическом преобразователе и потребляемый ток, а так же их частотные характеристики, значения эквивалентных RLC параметров схемы замещения УЗКС (см. рисунок 1) [2].

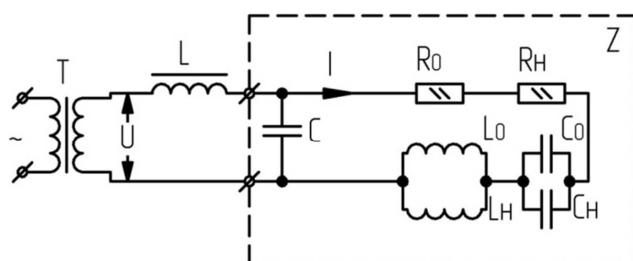


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС с пьезоэлектрическим преобразователем

Предпосылками такого способа контроля технологических процессов и явлений, протекающих в УЗ полях, стали, в частности, работы, посвященные автоматизации процесса сварки термопластичных материалов [3], и способ управления процессом УЗ липосакции [4,5].

Так анализ формы тока, потребляемого УЗКС в процессе сварки, позволяет контролировать ее стадии и выключать УЗ воздействие в момент формирования максимального по прочности соединения [3]. Аналогичным образом, путем контроля тока, потребляемого УЗКС при проведении процедуры УЗ липосакции (кавитационное разрушение жира), реализуется режим контроля процесса УЗ воздействия (детектор наличия акустической нагрузки на излучатель) для уменьшения мощности воздействия на интервале «холостой ход», исключая недопустимое воздействие на пациента [4,5].

Таким образом, схема косвенного контроля процессов и явлений, протекающих в УЗ полях, путем измерения параметров УЗКС может быть представлена в виде, показанном на рисунке 2. УЗКС воздействует на среду с определенными акустическими свойствами, в ней реализуется какой либо процесс, меняются свойства исходной среды и, меняются, соответственно, параметры УЗКС. Контролируя параметры УЗКС можно контролировать процессы, протекающие в УЗ полях и отслеживать изменение свойств сред.

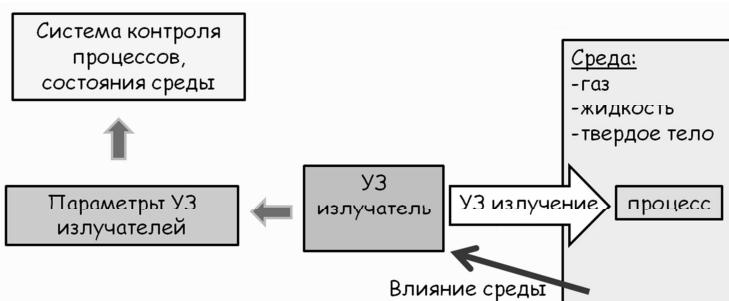
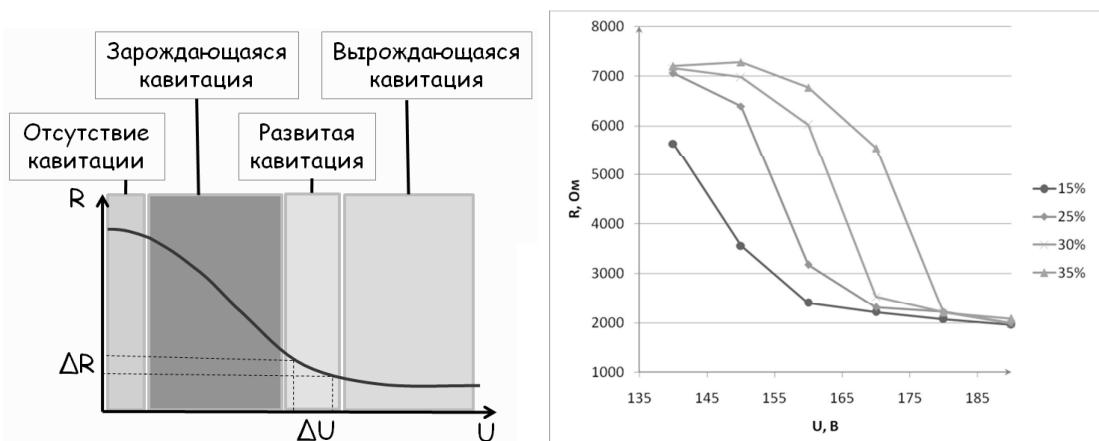


Рисунок 2 – Схема косвенного контроля технологических процессов и явлений, протекающих в УЗ полях,

реализация представленной на рисунке 2, схемы, а также проведенные практические исследования, позволили создать экспериментальное УЗ оборудование, способное контролировать процесс изменения свойств сред в ходе УЗ воздействия на них, идентифицировать различные озвучиваемые среды, контролировать развивающиеся в жидкых средах кавитационные явления (см. рисунок 3а).

На рисунке 3б представлено семейство кривых, характеризующих зависимость активного сопротивления  $R$  от напряжения возбуждения УЗКС, полученных для различных концентраций сахарозы.



а) зоны кавитационной активности б) для растворов сахарозы с различной концентрацией

Рисунок 3 – Типичная зависимость активного сопротивления механической ветви УЗКС от возбуждающего напряжения

Представленные кривые, с одной стороны иллюстрируют зависимость параметра R от степени развития кавитации в растворе, что позволяет контролировать стадии ее развития, а с другой стороны, эти кривые индивидуальны для каждой концентрации раствора, что позволяет контролировать процесс концентрирования растворов.

Представленные на рисунке 4 зависимости индуктивной части импеданса механической ветви УЗКС от напряжения питания, полученные при воздействии на среды с различными физическими свойствами, иллюстрируют возможность идентификации различных сред, и показывают принципиальную возможность контроля физических свойств обрабатываемых сред.

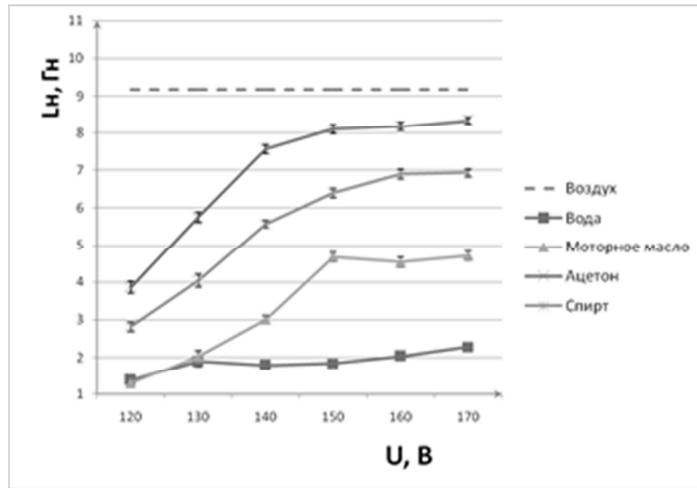


Рисунок 4 – Зависимость индуктивной части импеданса механической ветви УЗКС от возбуждающего напряжения

Интеграция системы косвенного контроля технологических процессов позволила создать новый класс УЗ аппаратов, способных обеспечить максимальную эффективность воздействия при обработке жидких, твердых и газообразных сред.

Предложенный и разработанный способ косвенного контроля параметров технологических процессов, протекающих в УЗ полях, может использоваться не только для оптимизации УЗ воздействия, но и для корректировки параметров согласующих цепей УЗ электронных генераторов, поскольку изменяющиеся свойства обрабатываемых сред влияют на эффективность работы системы энергопереноса «генератор-УЗКС-технологическая среда».

#### Литература

- Хмелев, В.Н., Барсуков Р.В., Генне Д.В., Ильченко Е.В. Интеграция системы контроля режима кавитационного воздействия в ультразвуковое технологическое оборудование // Ползуновский вестник. 2016. № 3. С. 87–92.
- Хмелев, В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В. Система контроля свойств технологических сред, подвергаемых воздействию ультразвуковых полей высокой интенсивности // Датчики и системы. 2013. № 6. С. 52–56.
- Способ герметизации картриджей для очистки воды [Текст]: пат. 2241599 Рос. Федерация: МПК7 B29C65/08 / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов, И.И. Савин, М.В. Хмелёв, С.В. Левин; заявл. 11.12.2003; опубл. 10.12.2004.
- Способ управления процессом ультразвуковой липосакции [Текст]: пат. 2240073 Российская федерация МПК A61B18/00, A61B17/32 / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2003107030/14; заявл. 13.03.2003; опубл. 20.11.2004.
- Хмелев, В.Н. Ультразвуковой аппарат для проведения лечебных и косметических процедур [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Е.В. Ильченко, Д.В. Генне, Д.С. Абраменко // Ползуновский вестник. – 2012 – № 2/1. – С. 196–200.

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СБОРКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Вишневская А.Н.

Самарский государственный технический университет, Самара  
a.vishnevskaya90@mail.ru

Показатели качества сборки машиностроительной продукции имеют большое значение в экономике. Самыми распространёнными видами сборки являются резьбовые соединения. В процессе сборки, технологические факторы приводят к отклонению от требуемой величины силы затяжки. К таким технологическим факторам относятся средства контроля силы, момент затяжки, расхождение расчётных параметров от фактических. Чем точнее реализована требуемая сила затяжки в процессе сборки, тем долговечнее прослужит соединение. Работа момента в процессе сборки резьбовых соединений, прикладываемая к болту, распределяется на полезную работу по созданию силы предварительной затяжки, по преодолению сил трения в резьбовой части и в местах контактирования с собираемыми деталями, причём до 90% работы момента на ключе идёт на преодоление сил трения. Оставшиеся 10% затрачиваются на полезное формирование силы затяжки.

Для повышения надёжности и эффективности данных соединений, ультразвуковые колебания вводят на основное движение в зону контакта поверхностей деталей, контактирующим деталям сообщаются ультразвуковые частотные колебания. Нам известны многие достоинства ультразвуковой сборки, в особенности, мало изучена возможность применения ультразвуковых колебаний в диагностических целях, но получаемая при этом информация может быть использована для управления технологическим процессом, оценки качества формируемого соединения, оперативной сборки деталей.

Рассмотрим патент РФ 2319603. Предполагаемое изобретение заключается в повышении эффективности процесса сборки, путём снижения трения и предела текучести на резьбовом соединении при воздействии ультразвуковых колебаний на рис.1.

Технический результат достигается за счёт воздействия на сборку ультразвуковых колебаний.

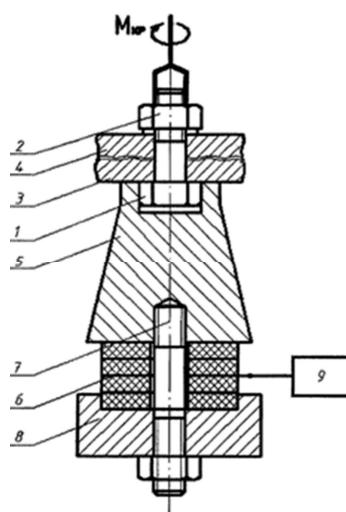


Рис. 1. Структурная схема устройства для реализации ультразвуковой сборки резьбовых соединений

Устройство содержит болт 1, гайку 2, собираемые детали 3 и 4, концентратор 5 колебаний, пьезокерамический преобразователь 6, набранный из дискретных шайб осевой поляризации, который зажат посредством шпильки 7 между концентратором 5 и частотопонижающим элементом 8 (демпфером). К пьезокерамическому преобразователю 6

подключён блок возбуждения колебаний 9 (регулируемый генератор электрических колебаний).

Способ сборки резьбовых соединений реализуют следующим образом. Производят наживление и свинчивание резьбового соединения. В контролируемом изделии, состоящем из собираемых деталей 3 и 4, в процессе затяжки возбуждают ультразвуковые колебания. Колебания возбуждают пьезокерамическим преобразователем 6, и усиливают по амплитуде концентратором колебаний 5. При соприкосновении гайки 2 с поверхностью собираемых деталей возрастает момент сопротивления завинчивания из-за действия сил трения как в резьбе, так и между поверхностями гайки и деталью, вследствие чего возрастает крутящий момент.

В момент затяжки резьбового соединения, путём приложения крутящего момента и воздействием ультразвуковых колебаний к крепёжной детали, выполняется контроль изменения знака приращения крутящего момента, соответствующий значению предела текучести материала. При росте момента завинчивания значение силы затяжки возрастает, и процесс затяжки входит в область пластических деформаций. Это должно учитываться при ультразвуковой сборке, чтобы не допустить разрушение соединения деталей.

Эти эффекты должны учитываться при ультразвуковой сборке для предотвращения разрушения соединения. Следует также учитывать, что с прекращением ультразвукового воздействия предел текучести  $\sigma_t^y$  принимает первоначальное значение  $\sigma_t$ , и деталь, затянутая до условного предела текучести, может оказаться недозатянутой. Этого можно избежать, учитывая, что эффективность воздействия ультразвука зависит от амплитуды колебаний. Амплитуда колебаний при этом не должна превышать значений, вызывающих снижение условного предела прочности, достаточного для разрушения болта под действием созданной силы затяжки.

Взаимозависимость между силой затяжки  $Q_3$ , моментом затяжки  $M_3$  и коэффициентом трения  $\mu$  для определённых значений предела текучести представлена на рис.2.

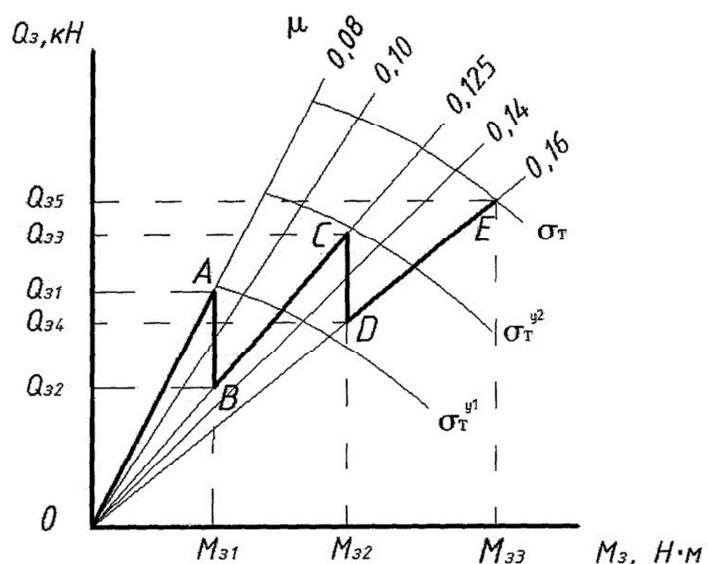


Рис. 2. Изменение силы затяжки крепёжной детали в зависимости от прикладываемого крутящего момента при ультразвуковой сборке:  $\sigma_t$  и  $\sigma_B$  - предел текучести и прочности при обычной сборке,  $\sigma_t^y$  и  $\sigma_B^y$  - предел текучести и прочности при ультразвуковой сборке

При постоянном значении коэффициента трения  $\mu$  процесс затяжки выражен прямой линией, проходящей через начало осей координат. Сила затяжки  $Q_3$  прямо пропорциональна моменту затяжки  $M_3$ . На диаграмме кривой линией указан предел текучести  $\sigma_t$  для различных коэффициентов затяжки. При превышении этого предела крепёжная деталь деформируется, становится практически непригодной.

Наживление, свинчивание и основную фазу затяжки следует производить при максимальных значениях амплитуды ультразвуковых колебаний. Сборка происходит с коэффициентом трения  $\mu=0,08$  (сборочный процесс идёт по отрезку 0А). При приложении момента затяжки  $M_{31}$  достигается сила затяжки  $Q_{31}$ , напряжения в крепёжной детали достигают условного предела текучести  $\sigma_t^{y_1}$ .

При прохождении процесса затяжки в области пластических деформаций положительный знак приращения крутящего момента меняется на отрицательный, что служит сигналом для уменьшения амплитуды ультразвуковых колебаний и увеличения крутящего момента. Снижение амплитуды ультразвуковых колебаний приводит к возрастанию коэффициента трения и изменению предела текучести до значения  $\sigma_t^{y_2}$ .

Процесс затяжки необходимо завершать при минимальной амплитуде ультразвуковых колебаний (1-2 мкм), чтобы не превысить предел текучести материала.

Также необходимо учитывать, что с прекращением ультразвукового воздействия предел текучести принимает первоначальное значение, и деталь, затянутая до условного предела текучести, может быть не полностью затянутой. Избежать этой ситуации можно, учитывая, что эффективное воздействие ультразвука зависит от амплитуды колебаний. В свою очередь, амплитуда колебаний не должна превышать значений снижения условного предела прочности, достаточного для разрушения детали под действием силы затяжки. Применение данного способа сборки резьбовых соединений с приложением ультразвуковых колебаний приводит к снижению энергетической напряжённости процесса на 45-55%, и является качественным формированием соединения.

### Литература

1. Вишневская А.Н. Инновационные технологии в металлообработке: Всероссийская научно-практическая конференция (Ульяновск, 12 ноября 2016 года): сборник научных трудов / отв. ред. Н. И. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С.197-200.
2. Патент SU 1505770 A1, B25B 21/00, опубликовано 07.09.1989, Бюл. №33. Способ сборки резьбовых соединений. В.А. Николаев, М.А. Куликов, Б.Л. Штриков.
3. Фролов К.В. и др. Машиностроение. Энциклопедия. М.: Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. 2006. 640 с.
4. Шуваев В.Г., Шуваев И.В. Применение дополнительных ультразвуковых колебаний при ударно-импульсной затяжке резьбовых соединений. Международный симпозиум «Надёжность и качество», Пенза, 25-31 мая 2011. 2 том. С. 230-231.

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ АБСОРБЦИИ ГАЗОВ

Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Нестеров В.А., Генне Д.В., Хмелёв М.В.

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Бийск  
romangl90@gmail.com

Один из перспективных способов увеличения эффективности абсорбции – воздействие ультразвуковыми колебаниями, которые за счёт действия кавитации увеличивают межфазную поверхность «газ-жидкость» и ускоряют диффузию газа в жидкость-абсорбент за счёт стационарных акустических течений [1–3].

Первые результаты по УЗ интенсификации абсорбции паров бензола маслом были получены еще в 1956 году в Днепропетровском химико-технологическом институте (скорость поглощения возрастила от 3 до 10 раз для различных условий реализации процесса).

Одним из наиболее ярких результатов последних лет [1, 2] является доказанная возможность очистки топливных газов от оксида азота под воздействием УЗ колебаний. Однако эффективная технология не получила промышленного применения из-за невозможности масштабирования полученных результатов и отсутствия комплексных исследований эффективности абсорбции в зависимости от режимов и условий УЗ воздействия.

Для выявления оптимальных режимов воздействия проведены теоретические исследования кинетики абсорбции при наложении ультразвуковых колебаний. Теоретический анализ проведен для модельной двухслойной системы «жидкость-газ» [3] (рис.1) и позволил определить усреднённую концентрацию абсорбируемого газа на выходе технологического объёма абсорбционного аппарата ( $C_{out\ avg.} = \frac{1}{h} \int_0^h C(L, y) dy$ ) в зависимости от режимов УЗ

воздействия (частота колебаний  $f$ , интенсивность колебаний  $I$ ), толщин слоёв газовой смеси  $h_g$  и жидкости-абсорбента  $h$ , скоростей течения газовой смеси  $u_g$  и жидкости-абсорбента  $u$ , концентрации абсорбируемого газа вблизи входного торца технологического объёма  $C_{gin}$ , протяжённости  $L$  канала технологического объёма, в котором происходит течение. При этом, степень увеличения производительности абсорбции (относительное увеличение производительности абсорбции) под действием ультразвуковых колебаний рассчитывалась исходя из выражения [3] (1):

$$\beta = \frac{C_{out\ avg.US}}{C_{out\ avg.NoUS}} ; \quad (1)$$

где  $C_{out\ avg.US}$  – усреднённая концентрация на выходе технологического объёма при включенном УЗ воздействии; моль/м<sup>3</sup>;  $C_{out\ avg.NoUS}$  – усреднённая концентрация на выходе без УЗ воздействия, моль/м<sup>3</sup>.

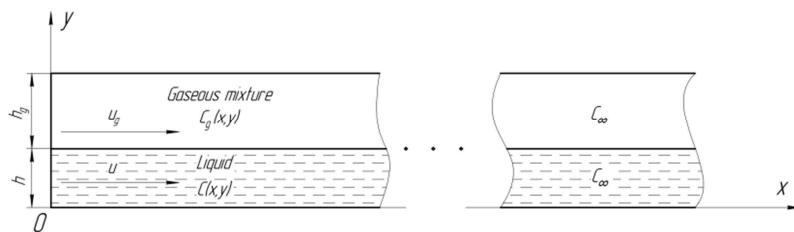


Рис. 1. Модельная двухслойная система «жидкость-газ» для теоретического анализа кинетики абсорбции

Распределение концентрации абсорбируемого газа в жидкой  $C(x,y)$  и газовой  $C_g(x,y)$  фазах при  $x = L$ , необходимое для расчёта производительности абсорбции, определяется с помощью предложенного Голых Р.Н. [3] метода разложения в операторные ряды с граничным условием на поверхности «жидкость-газ»:

$$C(x, y) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k)!} L^k [C_0(x)] \left(\frac{y}{h}\right)^{2k}; \quad (2)$$

$$C_g(x, y) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k)!} L_g^k [C_{g0}(x)] \left(\frac{h+h_g-y}{h_g}\right)^{2k}; \quad (3)$$

$$D_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=h} = D_g \frac{\partial C_g}{\partial y} \Big|_{y=h} = -K_S (C - C_g) \Big|_{y=h}; \quad (4)$$

где  $L$  и  $L_g$  линейные дифференциальные операторы  $L = \frac{h^2}{D_y} \left( u \frac{\partial}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right)$ ;

$$L_g = \frac{h_g^2}{D_g} \left( u_g \frac{\partial}{\partial x} - D_g \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right).$$

Учёт УЗ воздействия в разложениях произведён путём введения эквивалентных коэффициентов анизотропной диффузии  $D_x, D_y$ , вычисляемых методом усреднения величины конвективного переноса концентрации за счёт акустических течений, и эквивалентного коэффициента концентрационного взаимодействия  $K_S$ , который пропорционален площади поверхности раздела фаз  $K_S = \frac{S_{US}}{S_{NoUS}} K_{S0}$  [4] ( $S_{US}$  – площадь поверхности раздела фаз при УЗ воздействии,  $\text{м}^2$ ;  $S_{NoUS}$  – площадь поверхности раздела без УЗ воздействия,  $\text{м}^2$ ).

Без УЗ воздействия коэффициенты диффузии и концентрационного взаимодействия, входящие в уравнения (2-4) равны истинным значениям  $D_x=D_y=D, K_S=K_{S0}$ .

Проведённые исследования позволили установить оптимальные режимы УЗ воздействия [3], обеспечивающие максимальную эффективность абсорбции, а именно:

- интенсивность УЗ воздействия в пределах от 2 до 4 Вт/см<sup>2</sup> в зависимости от вязкости жидкости-абсорбента (например, 2 Вт/см<sup>2</sup> для жидкости вязкостью 1 мПа·с, 2,9 Вт/см<sup>2</sup> – для 3 мПа·с; 4 Вт/см<sup>2</sup> – для 7 мПа·с);

- частота УЗ воздействия должна составлять 22 кГц для обеспечения максимальной интенсивности кавитации, способствующей интенсификации абсорбции [5].

Выявленные режимы воздействия обеспечивают повышение производительности абсорбции на 80% для жидкостей-абсорбентов с вязкостью 7 мПа·с, и более чем в 2 раза для жидкостей, по вязкости близких к воде (1 мПа·с).

Для выдачи рекомендаций по промышленному применению была произведена оценка протяжённости канала технологического объёма, обеспечивающего максимальное изменение концентрации абсорбируемого газа (разница между концентрациями газа на входе и выходе технологического объёма  $\Delta C = C_{gin} - C_{out\ avg.}$ ) при различных пневматических давлениях на входе. Установлено, что зависимость изменения концентрации абсорбируемого газа от протяжённости канала в диапазоне от 0 до 100 см монотонно возрастает и имеет слабую нелинейность.

Поэтому, при реализации промышленной технологии, длина канала технологического объёма должна быть ограничена протяжённостью зоны кавитации (зоны возникновения схлопывающихся пузырьков), создаваемой одним излучателем, увеличиваемой на количество используемых излучателей, т.е. значением, не превышающим 50 см при одном излучателе для жидкости абсорбента, по вязкости близкой к воде. При этом пневматическое давление абсорбируемого газа на входе должно составлять не менее 1,5 МПа.

Для экспериментального подтверждения выявленных режимов ультразвукового воздействия был изготовлен специализированный стенд (рис. 2), имитирующий реальные условия протекания абсорбции.

Оборудование для комплектации стенда выбиралось исходя из полученных

теоретических данных об оптимальных режимах ультразвукового воздействия, необходимом давлении абсорбируемого газа и протяжённости канала технологического объёма, а именно:

–для протекания абсорбционного процесса диаметр технологического объёма составлял 20 см, а длина – 50 см;

–для УЗ воздействия на жидкость-абсорбент использовался ультразвуковой технологический аппарат «Волна-М» модели УЗТА-1/22-ОМ или аналогичный, способный обеспечить интенсивность УЗ колебаний не менее 4 Вт/см<sup>2</sup> на частоте 22 кГц;

–для подачи абсорбируемого газа (CO<sub>2</sub>) использовался углекислотный баллон с редуктором-регулятором давления УР-6-6, обеспечивающий максимальное пневматическое давление не менее 1,5 МПа;

–для подачи жидкости-абсорбента использовался перистальтический насос NAV-4, способный обеспечить расход не менее 4,5 л/ч;

–для определения эффективности абсорбции рекомендовано использовать один из стандартных газоанализаторов модели Breeeth, способный измерять концентрацию CO<sub>2</sub> в диапазоне от 0 до 10 000 ppm с точностью до ±50 ppm.

На рис. 2 представлены эскиз (а) и фото (б) технологического объёма, входящего в состав стенда, с установленным УЗ излучателем технологического аппарата «Волна-М».

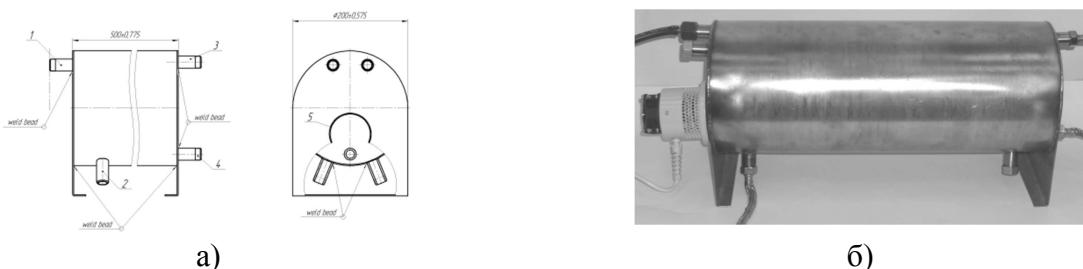


Рис. 2. Эскиз (а) и фото (б) технологического объёма для протекания абсорбции с установленным ультразвуковым излучателем

Созданный стенд позволил подтвердить эффективность абсорбции при реализации выявленных оптимальных режимов ультразвукового воздействия и рекомендовать их для реализации в промышленных абсорбционных аппаратах.

Полученные результаты могут быть положены в основу ультразвуковой интенсификации абсорбционного разделения газовых смесей в различных производствах.

Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента РФ № МК-4515.2016.8.

#### Литература

- Laugier F., Andriantsiferana C., Wilhelm A.M., Delmas H. Ultrasound in gas-liquid systems: Effects on solubility and mass transfer // Ultrasonics Sonochemistry. 2008. Vol. 15. Iss. 6. P. 965-972.
- Adewuyi Y.G., Khan N.E. Modeling the Ultrasonic Cavitation-Enhanced Removal of Nitrogen Oxide from Flue Gases in a Bubble Column Reactor // American Institute of Chemical Engineers Journal. 2012. Vol. 58. No. 8. P. 2397-2411.
- Golykh R.N. The modeling of absorption in two-layer system "gaseous mixture-liquid" under ultrasonic vibrations influence // American Journal of Engineering Research. 2016. Vol. 5. No. 12. P. 37-45.
- Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunova A.V., Nesterov V.A., Ilchenko E.V. Study of Interaction on Cavitation Zone With Interphase Boundary For the Determination of Efficient Modes of Ultrasonic Intensification of Physical-chemical Processes // EDM'2015: Conference Proceedings. 2015. P. 249-252.
- Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Bazhin V.E., Nesterov V.A. Determination of Optimum Conditions of Ultrasonic Cavitation Treatment of High-viscous and Non-newtonian liquid media // EDM'2015: Conference Proceedings. 2015. P. 208-212.

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАКРОМОЛЕКУЛ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Шакура В.А., Ильченко Е.В.**

*Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Бийск*  
romangl90@gmail.com

Современное развитие машино-, приборостроения, медицины, транспорта, авиации и ракетно-космической техники определяется создаваемыми новыми конструкционными материалами с улучшенными механическими свойствами [1].

Основная задача сегодняшнего дня – создание новых образцов материалов путем решения двух взаимоисключающих задач – одновременного обеспечения низкой удельной массы и высоких прочностных свойств материалов.

Многообещающим и успешно развивающимся направлением решения этой задачи является создание и применение полимерных материалов, которые оказываются более чем в 5 раз легче традиционных металлов и сплавов. Однако обеспечение необходимых прочностных свойств полимеров невозможно без модификации их физико-химической структуры [1, 2].

Среди известных способов модификации структуры полимеров наибольшее развитие получил способ, основанный на введении дисперсных наполнителей при формировании полимерных композиций. Однако предел прочности полимерных композиций, при котором не возникают микротрешины и не сохраняются остаточные деформации, достигает не более чем 150 МПа, даже при введении углеродных нанотрубок размером менее 100 нм [3]. Это связано как с недостаточной поверхностью взаимодействия полимерного связующего и наполнителя, так и с неоднородностью молекулярной структуры полимера, вызванной большим количеством мономерных звеньев (вплоть до 10000).

Перспективный способ увеличения поверхности взаимодействия связующего с наполнителем и гомогенизации высокомолекулярного соединения – предварительное ультразвуковое (УЗ) кавитационное воздействие на материал в неотверждённом состоянии [2, 4]. УЗ воздействие в кавитационном режиме позволяет сконцентрировать энергию распространяющихся в среде колебаний в энергию кавитационных пузырьков, в которых возникают локальные повышения температуры до 5000 К, а при их взрывах возникают ударные волны с амплитудой давления до 1000 МПа. Это приводит к разрушению молекулярных связей, обеспечивает однородность структуры многокомпонентного материала, равномерное распределение армирующих частиц и может повысить прочностные свойства материала во всех направлениях деформации [2, 6].

Целенаправленное получение материала с необходимыми свойствами для определённого применения требует подбора режимов УЗ кавитационного воздействия.

На сегодняшний день наиболее полно изучено влияние режимов УЗ кавитационного воздействия на увеличение суммарной поверхности армирующих частиц наполнителя полимерного материала [5, 6]. В то время как действие кавитации на структуру макромолекул полимера до сегодняшнего дня подробно не исследовалось.

В связи с этим предложена и разработана модель кавитационного воздействия на молекулярную структуру полимера, позволяющая выявить зависимости изменения структуры молекул от режимов кавитационного воздействия.

Как известно, полимеры в неотверждённом состоянии представляют собой жидкие среды, состоящие из молекулярных цепочек мономеров, соединённых водородными связями. Кавитация приводит к разрушению молекулярных цепочек. При этом фракционный состав молекулярных цепочек по концентрации молекул с разными количествами мономерных звеньев определяет реологические свойства материала, от которых, в конечном итоге, зависит прочность изделия на базе полимера с добавленным отвердителем, пропитывающая способность и однородность структуры материала.

Проведенный теоретический анализ воздействия кавитации на структуру макромолекул

полимера основывался на следующих допущениях:

1. Все мономерные звенья макромолекул имеют одинаковую массу, равную  $m_0$ .

2. Каждая молекулярная цепочка представляет собой линейную структуру (рис. 1), характеризующуюся числом мономерных звеньев  $N$ , единичным вектором ориентации  $\mathbf{n}$  ( $\|\mathbf{n}\|=1$ ), скоростью центра масс  $\mathbf{v}$  и собственным моментом импульса  $\mathbf{l}$  (моментом импульса макромолекулы в системе отсчёта её центра масс).

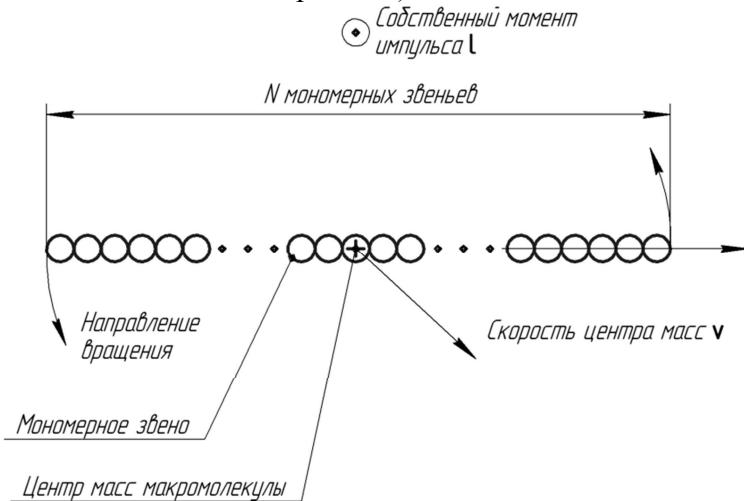


Рис. 1. Линейная модель макромолекулы.

3. Состояние полимерной среды однозначно характеризуется функцией распределения макромолекул по числам мономерных звеньев, векторам ориентации, скоростям и собственным моментам импульса  $f(N, \mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l}, t)$  ( $t$  – момент времени). Функция распределения нормируется на плотность  $\rho$  неотверждённого полимера следующим образом

$$\rho = \sum_{N=1}^{\infty} \int \int \int \int f(N, \mathbf{n}, \mathbf{v}, \mathbf{l}, t) \partial S(\mathbf{n}) \partial \mathbf{l} \partial \mathbf{v}.$$

4. Плотность полимера является неизменной с течением времени кавитационного воздействия

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0.$$

5. Распад макромолекул возможен лишь при возникновении ударной волны, возникающей при схлопывании кавитационных пузырьков. При отсутствии кавитационного воздействия распада макромолекул не происходит.

6. Распад молекулы происходит тогда и только тогда, когда скорость столкновения молекул превышает определённое пороговое значение, при котором преодолевается потенциальное поле сил водородных или углеродных связей.

Для определения фракционного состава макромолекул в результате их распада было получено выражение для вероятности распада отдельной молекулы:

$$P_{br} = \frac{45 \left( \max_t \left| \int_S \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{r}, t) \partial S \right|^3 \right) n_{bub}}{32 \pi^2 \rho^3 v_{th}^6};$$

$p$  – давление ударной волны в ядре кавитационного пузырька при схлопывании, Па;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{th}$  – пороговая скорость столкновения макромолекул, при которых происходит разрыв водородных связей, м/с;  $n_{bub}$  – концентрация кавитационных пузырьков, м<sup>-3</sup>.

Установлено, что для полимерных жидкостей с вязкостью 0,3 Па·с, вероятность разрушения макромолекулы при повышении интенсивности с 15 до 35 Вт/см<sup>2</sup> (частота колебаний 22 кГц) увеличивается в 200 раз, а для жидкостей с вязкостью 0,5 Па·с более чем в

1000 раз. Это связано с тем, что макромолекулы более вязких жидкостей имеют большее число мономерных звеньев.

С использованием выражения для вероятности распада на основании уравнения Смолуховского далее был произведен расчёт фракционного состава макромолекул, позволившего определить вязкость полимера в результате УЗ кавитационного воздействия.

Для определения вязкости полимера в зависимости от фракционного состава макромолекул был использован статистический подход, основанный на методах физической кинетики.

Согласно данному подходу первоначально рассматриваются кинетические уравнения Больцмана для монодисперсных макромолекул с использованием BGK-приближения (Бхатнагара-Гросса-Крука). Эти уравнения позволяют определить выявить вязкость жидкости из монодисперсных макромолекул с фиксированным количеством структурных звеньев. BGK-приближение определяет вязкость как величину, обратно пропорциональную среднему времени свободного пробега молекул. Вязкость жидкости из полидисперсных макромолекул определяется как статистическая сумма вязкостей жидкостей из монодисперсных молекул с учётом вклада, вносимого столкновениями между молекулами разных сортов (с разным количеством мономерных звеньев).

Анализ полученных соотношений позволил выявить режимы ультразвукового кавитационного воздействия, необходимые для достижения заданных реологических свойств полимерных материалов в неотверждённом состоянии.

В частности, установлено, что воздействие с интенсивностью колебаний  $10 \text{ Вт}/\text{см}^2$  в течение 15 мин позволяет снизить вязкость полимера с  $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  до  $0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , а при  $20 \text{ Вт}/\text{см}^2$  – с  $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$  до  $0,12 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Полученные результаты послужат основой для дальнейших исследований влияния кавитации на прочностные свойства полимера в разных направлениях деформации после добавления отвердителя (на основании моделей химической кинетики и фазовых переходов). Это в перспективе даст возможность сформировать рекомендации по выбору режимов для промышленной реализации ультразвукового кавитационного воздействия в производстве изделий на основе полимеров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-08-01298 а.

#### Литература

1. Магсумова А.Ф., Амирова Л.М., Ганиев М.М. Влияние ультразвуковой обработки на технологические свойства эпоксидного олигомера // Вестник КГТУ им. Туполева. 2005. № 2.
2. Golykh R.N. Gaseous bubble oscillations in anisotropic non-Newtonian fluids under influence of high-frequency acoustic field // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 722. Conf. 1. 8 p.
3. Шебанов С.М. Деформации при многократном сжатии в нелинейной области нанокомпозита эпоксидная смола – многослойные углеродные нанотрубки // Композитный мир. 2010. Июль-август.
4. Khmelev V.N., Golykh R.N., Shalunov A.V., Bazhin V.E., Nesterov V.A. Determination of Optimum Conditions of Ultrasonic Cavitation Treatment of High-viscous and Non-newtonian liquid media // EDM'2015: Conference Proceedings. 2015. P. 208-212.
5. Golykh R.N. Theoretical and experimental study of cavitation dispersing in “liquid-solid” system for revelation of optimum influence modes // Americal Journal of Engineering Research. 2016. Iss. 1. P. 159–168.
6. Хмелёв В.Н., Хмелёв С.С., Карзакова К.А., Голых Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового воздействия при производстве высоконаполненных композиционных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 2. С. 189-192.

# АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА VERASONICS С ОТКРЫТОЙ АРХИТЕКТУРОЙ: ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Демин И.Ю.<sup>1</sup>, Гурбатов С.Н.<sup>1</sup>, Рыхтик П.И.<sup>2</sup>, Сафонов Д.В.<sup>3</sup>,  
Андреев В.Г.<sup>4</sup>, Камалов Ю.Р.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Приволжский окружной медицинский центр ФМБА России, Нижний Новгород

<sup>3</sup>Нижегородская государственная медицинская академия, Нижний Новгород

<sup>4</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>5</sup>ФГБНУ “Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского”, Москва  
phdem56@gmail.com demin@rf.unn.ru

## Введение

Исследовательская акустическая система Verasonics (*VERASONICS INC., Kirkland, WA 98034, USA*) была разработана как удобный инструмент для передачи, приёма и обработки ультразвуковых сигналов. По существу, все аспекты современных ультразвуковых систем представлены пользователю для создания новых методов сбора и обработки ультразвуковых сигналов как в задачах био-медицинской акустики, так и в задачах дефектоскопии. Основным достоинством системы Verasonics является то, что она предоставляет широкие возможность исследователю как в разработке новых методов формирования ультразвуковой волны настраиваемыми массивами преобразователей, так и создание новых алгоритмов обработки изображений, используя среду программирования MATLAB.

Акустическая система Verasonics с открытой архитектурой расположена в лаборатории «Биомедицинских технологий, медицинского приборостроения и акустической диагностики (МедЛаб)» на кафедре акустики Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского [1]. На рис.1 представлены внешний вид и блок-схема системы Verasonics, которая представляет собой управляющий блок, подсоединяемый к компьютеру 1 с помощью карты расширения. Передаваемый сигнал формируется формирователем 2 и далее поступает в многоканальный блок цифрового аналогового преобразователя, к которому присоединяется стандартный медицинский ультразвуковой датчик 4 стандарта ATL. Принятый сигнал поступает на многоканальный блок цифрового аналогового преобразователя 5 и накапливается в выходном буфере 6, из которого по определенной команде передается в компьютер. Внешний блок питания 7 используется для реализации режимов повышенной мощности.



Рис. 1а. Внешний вид  
исследовательской акустической  
системы Verasonics

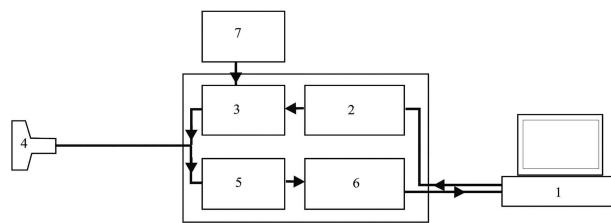


Рис.1 б. Блок-схема исследовательской  
акустической системы Verasonics

Технические характеристики акустической системы Verasonics:

1. 256 излучаемых и 128 приемных каналов
2. Несущая частота: от 1 до 15 МГц
3. Программируемое время задержки: с точностью до 5,56 нс
4. Программируемая амплитуда генератора импульсов: от 3 до 190 В (от пика к пику)
5. Излучаемая мощность ультразвука: до 1000 Вт
6. Длительность импульса: от 2 периодов несущей частоты до 1000 мс

## Ультразвуковая эластография по скорости сдвиговых волн

Визуализация и измерение упругости тканей становится одной из опций современной аппаратуры ультразвуковой медицинской диагностики. Количественные значения модуля Юнга, а соответственно и модуля сдвига мягких биологических тканей, врач может применить для обнаружения опухолей, определения степени фиброза печени и для диагностики других патологий на ранних стадиях заболевания. Дело в том, что модуль Юнга и модуль сдвига в случае патологии могут изменяться на порядки, в то время как объемная сжимаемость мягких биологических тканей изменяется на проценты. В связи с этим, вполне логично создать диагностическую методику, которая, помимо продольных ультразвуковых волн, использовала бы сдвиговые волны, скорость распространения которых напрямую связана с модулем сдвига, который, в свою очередь, связан с модулем Юнга [1]. Наиболее перспективным методом измерения и картирования упругости тканей является метод, основанный на бесконтактном возбуждении и регистрации скорости сдвиговой волны. Одним из методов измерения сдвиговых характеристик мягких биологических тканей на данный момент является метод Shear Wave Elasticity Imaging (SWEI), который в 1998 году был предложен О. В. Руденко, А. П. Сарвазяном и соавторами [2].

Экспериментальное определение скорости сдвиговой волны и модуля Юнга проводились в калиброванных полимерных фантомах CIRS Model 049A Elasticity QA Phantom Stepped Cylinder (производства USA), содержащем ступенчатые цилиндры (рис. 2а), и CIRS Model 049 Elasticity QA Phantom Spherical с расположенными на разной глубине сферами диаметром 10 мм и 20 мм (рис. 2б). Ступенчатые цилиндры и сферы в фантомах были четырех типов с разным значением модуля Юнга (Type I–IV), указанном в сопровождающих документах. Данные элементы находились в полимерной среде (матрица), упругие характеристики которой также были известны. Достоинством фантомов является то, что они изготовлены из полимерного материала Zerdine, характеристики которого не зависят от изменения внешней температуры и прикладываемого давления.



Рис. 2а. Калиброванный полимерный фантома CIRS Model 049A Elasticity QA Phantom Stepped Cylinder



Рис. 2б. Калиброванный полимерный фантома CIRS Model 049A Elasticity QA Phantom Spherical

Измерения были проведены в лаборатории «МедЛаб» Нижегородского госуниверситета с помощью исследовательской системы с открытой архитектурой V-1 Electronics фирмы «Verasonics», где реализовался алгоритм, разработанный авторами доклада [3], а также на базах Приволжского окружного медицинского центра (г. Нижний Новгород) и Российского научного центра хирургии им. акад. Б.В. Петровского (г. Москва) с использованием экспертных ультразвуковых системы Acuson S2000 фирмы «Siemens». При проведении исследований на акустической системе Verasonics использовался стандартный многоэлементный датчик L7 – 4 с следующими параметрами: число элементов 128, размер элемента 7x0.283 мм, расстояние между соседними элементами 0.025 мм. Рабочая частота была выбрана равной 5 МГц (как для изображающих импульсов, так и для толкающего импульса) и использовалась стандартная амплитуда диагностических импульсов 50 В. В ультразвуковых системах фирмы Siemens

Acuson S2000 использовался датчик 9L4. Были измерены скорости сдвиговой волны в объеме фантомов и различных включениях, при этом сдвиговая волна возбуждалась как в центральной части неоднородности, так и на различных расстояниях от центра.

По результатам исследования получено хорошее согласование в определении скорости сдвиговой волны между этими приборами и установлена их высокая точность в определении калиброванных значений (табл. 1).

Таблица 1

Скорости сдвиговой волны в различных зонах полимерного фантома CIRS Stepped Cylinder, измеренные на аппаратах Verasonics и Siemens Acuson S2000

	Скорость сдвиговой волны (м/с)	
	<i>Verasonics</i>	<i>Siemens Acuson S2000</i>
Background	$2,3 \pm 0,6$	2,4
Type I	$1,3 \pm 0,28$	1,46
Type II	$1,9 \pm 0,43$	1,9
Type III	$3,3 \pm 0,94$	3,28
Type IV	$4,9 \pm 1,6$	4,8

Вычислены модули Юнга и проведено сравнение с значениями, данными производителями. Показано, что обе системы дают результаты, близкие к калибровочным значениям в неоднородностях с размерами 2- 4 см на глубине до 4 см. При измерениях вблизи края неоднородности отмечена значительная погрешность в определении модуля Юнга. Это связано с усреднением значений скорости волн, распространяющихся по двум направлениям от области возбуждения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 14-12-00882)

#### Литература

1. Руденко О. В., Сафонов Д. В., Рыхтик П. И., Гурбатов С. Н., Романов С. В. Физические основы эластографии. Часть 2. Эластография на сдвиговой волне (лекция) // Радиология – практика. 2014. № 4 (46). С. 62-72.
2. Sarvazyan A. P., Rudenko O. V., Swanson S. D., Folwkes J. B., Emelianov S. Y. Shear Wave Elasticity Imaging – a New Ultrasonic Technology of Medical Diagnostics. // Ultrasound in Medicine and Biology. 1998. V. 24. № 9. P. 1419 – 1436.
3. Андреев В.Г., Демин И.Ю., Шанин А.В. Движение группы жестких микрочастиц в вязкоупругой среде под действием акустической радиационной силы // Акустический журнал. 2014. Т. 60. № 6. С. 673-678.

# СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ АМПЛИТУДЫ СМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ТОРЦА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Шестовских А.Е.<sup>1</sup>, Архипов Ю.Е.<sup>1</sup>, Кандалинцев Б.А.<sup>1</sup>, Коптяков А.С.<sup>1,2</sup>,  
Тимофеев В.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО НПП "РЭЛТЕК", Екатеринбург

<sup>2</sup>УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург  
[reltec@reltec.biz](mailto:reltec@reltec.biz)

В ряде технологических процессов, использующих ультразвуковое воздействие на обрабатываемую среду, требуется дозирование (регулирование) вводимой в среду акустической энергии.

Так, при обработке расплавов металлов необходима максимальная и неизменная по величине акустическая энергия, которую необходимо ввести в расплав, чтобы получить стабильные характеристики расплава и сократить время его обработки и тем самым повысить производительность установки [1].

Особо жесткие требования предъявляются к стабилизации акустической энергии при ультразвуковом упрочнении деталей сложной формы методом поверхностного пластического деформирования за счет кинетической энергии движущихся упрочняющих тел (шариков). При этом для различных обрабатываемых деталей требуется стабилизация акустической энергии на заданном данной технологией уровне.

Уровень интенсивности ультразвука имеет большое значение при акустической коагуляции суспензий. При недостаточной интенсивности процесс коагуляции и осаждения замедляется, а чрезмерное повышение интенсивности для данной частоты вызывает обратный процесс – диспергирование частиц. Чтобы получить нужный технологический процесс при обработке суспензий необходимо оптимизировать и стабилизировать величину интенсивности ультразвука [2].

Удельная акустическая энергия характеризуется интенсивностью ультразвуковых колебаний, интенсивность можно выразить следующей функцией:

$$I = f(A),$$

где:  $A = f(P_{эл})$  – амплитуда колебаний частиц среды (амплитуда смещения рабочего торца излучателя);

$P_{эл}$  – активная электрическая мощность, потребляемая магнитострикционным преобразователем.

Зависимость акустической энергии (интенсивности) от амплитуды смещения торца излучателя используется в разработанной НПП «РЭЛТЕК» ультразвуковой установке для регулирования и стабилизации акустической энергии. В состав установки входят: объект управления – акустическая система, основой которой является ультразвуковой магнитострикционный преобразователь с датчиком обратной связи (ОС), и устройство управления, выполненное на базе программно-аппаратных средств (промышленный контроллер и компьютер). Программное обеспечение (ПО) контроллера формирует требуемую структуру устройства управления. Структурная схема следящей системы приведена на рис. 1.

Применение автоматической следящей системы позволяет: полностью исключить человеческий фактор в процессе управления амплитудой смещения; обеспечить высокую повторяемость результатов; обеспечить сопряжение разработанной системы с освоенными на предприятии системами управления и применяемыми пользовательскими интерфейсами; использовать имеющийся на предприятии опыт в части согласования элементов вновь разрабатываемых программ и информационно – управляющих систем на их основе, с элементами стандартной (готовой) программы управления объектами (управляющая программа среда верхнего уровня - "SCADA"). Следящая система позволяет реализовать цифровую систему автоматического регулирования, линейную одноконтурную систему с отрицательной обратной связью, а также закон регулирования по П-регулятору [3].

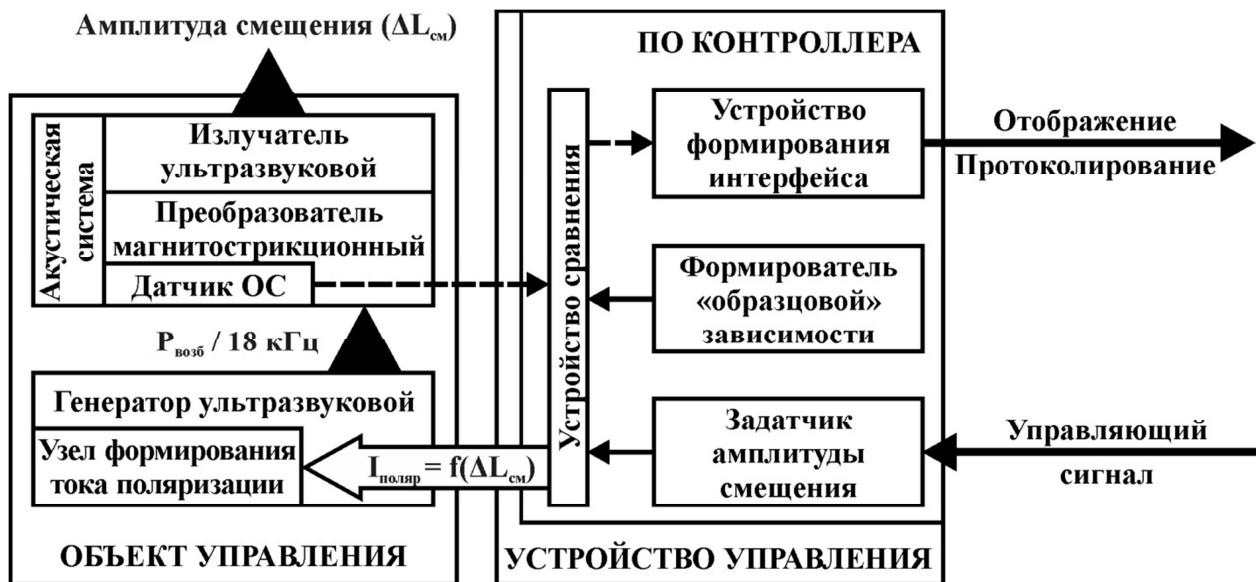


Рис. 1. Структурная схема следящей системы

Разработанный способ воздействия на обрабатываемую жидкую или твердую среду (изделие) с помощью УЗ колебаний рабочего торца волновода акустической системы позволил создать установку, принцип работы которой основан на использовании зависимости амплитуды смещения рабочего торца акустической системы от мощности возбуждения системы, создаваемой УЗ генератором. Мощность возбуждения, в свою очередь, зависит от тока поляризации, протекающего через обмотку магнитострикционного преобразователя, который является нагрузкой генератора. Ток поляризации ( $I_{\text{поляр}}$ ) создается встроенным в генератор узлом формирования тока поляризации, и может быть изменен под действием сигнала управления (см. рисунок 1). При изменении (например, увеличении) тока поляризации уменьшается активное электрическое сопротивление, которое представляет собой магнитострикционный преобразователь на его резонансной частоте, следовательно, возрастает выходная мощность УЗ генератора (мощность возбуждения акустической системы) и, соответственно, амплитуда смещения [4].

Нагрузкой УЗ генератора является разработанный предприятием ультразвуковой магнитострикционный преобразователь с датчиком обратной связи типа ПМС-4-18 ОС (аналог ПМС-15А -18), который является активным элементом ультразвуковой акустической системы. Датчик обратной связи (ОС) формирует напряжение обратной связи, пропорциональное амплитуде смещения торца преобразователя, а, следовательно, и амплитуде смещения рабочего торца излучателя, каковым является свободный торец волновода, присоединенного к магнитострикционному преобразователю. "Образцовая зависимость", формируемая в устройстве управления, представляет собой аналог реально снятой зависимости  $U_{\text{oc}} = f(\Delta L_{\text{cm}})$  преобразователя ПМС-4-18 ОС в составе акустической системы. Разность между образцовым и текущим значениями  $U_{\text{oc}}$  создает управляющее воздействие на узел формирования тока поляризации, стремясь уменьшить эту разность до нуля, что соответствует заданному значению амплитуды смещения. Амплитуда смещения рабочего торца излучателя задается оператором, заданное значение поддерживается следящей системой, которая является частью информационно - управ器ющей системы установки.

Устройство управления выполнено с применением программно-аппаратных средств промышленного контроллера и формирует требуемую структуру системы управления. Программное обеспечение имеет трехуровневую структуру, нижним уровнем которого является программное обеспечение УЗГ, на среднем уровне осуществляется взаимодействие всех устройств установки, на верхнем — обеспечивается человеко-машинный интерфейс контроля и управления установкой. Данная структура позволяет управлять параметрами

технологического процесса, архивировать и визуализировать переменные техпроцесса. Устройство управления собрано в компьютерной стойке, на лицевой панели которой расположен сенсорный экран. Предусмотрена возможность применения двухконтурной схемы воздушного охлаждения стойки для обеспечения работоспособности установки в условиях высокой запыленности производственного участка. Акустическая система установки представляет собой конструктивно законченный узел, не связанный механически со стойкой, который размещается на оборудовании потребителя.

В рассмотренной ультразвуковой установке используется стержневой магнитострикционный преобразователь, оснащенный дополнительной обмоткой для обратной акустической связи, которая позволяет контролировать амплитуду смещения рабочего торца излучателя. Однако обработка жидких сред часто производится мембранными магнитострикционными преобразователями, не снабженными датчиками обратной связи. Такой преобразователь типа ПМС-2,5-22 (аналог ПМС-6-22) разработан НПП «РЭЛТЕК» и успешно эксплуатируется в технологических линиях предприятий. При использовании данного преобразователя в системе регулирования и стабилизации акустической энергии используется упрощенная функциональная связь между акустической мощностью, вводимой в обрабатываемую среду, и электрической мощностью, потребляемой преобразователем:

$$P_{ак} = f(P_{эл}).$$

В реальных технологических установках эта зависимость имеет вид:

$$P_{ак} = (0,4 \div 0,48)P_{эл}.$$

Реализованный в технологических ультразвуковых установках способ стабилизации амплитуды смещения рабочего торца излучателя успешно прошел испытания на предприятии «РУСАЛ ИТЦ» при обработке алюминиевых расплавов, а также на ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» для упрочнения лопаток моноколес авиационных турбин.

#### Литература

1. Alba-Baena, N. Kinetic of ultrasonic degassing of aluminum alloys / N. Alba-Baena, D. Eskin // Light Metals 2013 / ed. by B. A. Sadler. – Hoboken, 2013. – P. 957-962.
2. Ультразвук в гидрометаллургии / Б.А. Агранат, О.Д. Кириллов, И.А. Преображенский и др. // М., Металлургия, 1969. 303 с.
3. Максимов М.В., Меркулов В.И. Радиоэлектронные следящие системы (Синтез методами теории оптимального управления). М.: Радио и связь, 1990. 256 с.
4. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: Машгиз, 1959. 331 с.

# **ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

**Крылова Н.А.**

*Самарский государственный технический университет, Самара  
kryl.nad@gmail.com*

В процессе эксплуатации на рабочей поверхности детали возникает множество концентраторов напряжений и, как следствие, поверхностные слои, подвергаются активному воздействию внешних факторов. Для снижения воздействия данных факторов необходимо улучшение физико-механических характеристик и геометрии поверхностного слоя обрабатываемой детали, причем состояние рабочей поверхности детали оказывает влияние на такие ее эксплуатационные свойства, как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость и др.

Обработку деталей сложной формы осуществляют методом поверхностно – пластического деформирования (ППД). Данный метод является одним из наиболее эффективных и экономичных. В результате обработки данным методом происходит упрочнение поверхностного слоя детали, а также улучшение эксплуатационных характеристик. Одним из эффективных методом решения задач, возникающих при ППД, является наложение ультразвуковых колебаний, дающих возможность управлять микрогеометрией формируемой поверхности, её твёрдостью, степенью деформационного упрочнения, а также получать регулярный микрорельеф [2].

На рис.1 представлено ультразвуковое устройство для формирования микрорельефа поверхностей. Устройство содержит концентратор 2, на выходном конце которого размещается деформирующий элемент – шарик 1, который воздействует на обрабатываемую поверхность. Для возбуждения ультразвуковых колебаний применен пакетный пьезокерамический преобразователь 4, зажатый при помощи шпильки 7 и гайки 6 между концентратором 2 и противовесом 5. На боковой поверхности концентратора выполнены наклонные пазы 3, позволяющие возбуждать продольно-крутильные колебания деформирующего элемента. Кроме того, деформирующий элемент смещен относительно оси концентратора, что приводит к формированию сложной траектории вибрационного воздействия на поверхность обрабатываемой детали. При подаче с генератора электрического напряжения синусоидальной формы и резонансной частоты на обкладки пакетного пьезокерамического преобразователя, он, изменяя вследствие обратного пьезоэффекта свои геометрические размеры, возбуждает механические колебания концентратора и, соответственно, деформирующего элемента.

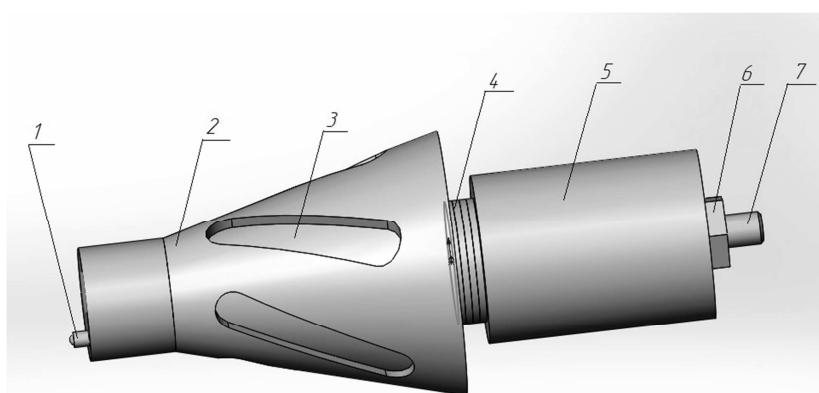


Рис. 1. Ультразвуковое устройство для формирования микрорельефа поверхностей

Устройство выполнено на основе пакетного пьезокерамического преобразователя из четырех шайб пьезокерамики типа ЦТС-19.

Сложное колебательное движение формируется в результате сложения колебаний, действующих в трёх плоскостях: продольное (получаемое в результате перемещения инструмента вдоль оси детали); крутильное (получаемое в результате вращения инструмента по наклонным пазам), продольное (получаемое в результате импульсного воздействия на инструмент).

Характеристики, влияющие на результирующее движение во время обработки:

- 1) Частота колебаний. Чем выше частота, тем выше плотность рисунка, образующегося в результате обработки.
- 2) Радиус наконечника (шарика). При увеличении радиуса, увеличивается пятно контакта наконечника с обрабатываемой поверхностью.
- 3) Угол смещения наконечника. В результате изменения угла смещения наконечника изменяется соотношение величин амплитуд колебания в тангенциальном и продольном направлениях. При величине угла близкой к  $0^\circ$  преобладают тангенциальные колебания, при величине близкой к  $90^\circ$  – продольные.
- 4) Скорость движения инструмента вдоль тела детали. При относительно низких скоростях – рисунок более растянут вдоль оси абсцисс.
- 5) Скорость вращения детали. При относительно низких скоростях – рисунок более растянут вдоль оси ординат.
- 6) Время импульсного воздействия. При различной длительности импульсного воздействия, меняется рисунок и его длина.

При финишной обработке данным устройством с оптимальными параметрами повышается эффективность, расширяются технологические возможности ультразвуковой финишной обработки. В результате, обработанная деталь обладает такими свойствами, как: высокое качество обработанной поверхности, повышенные надежность и долговечность работы, а также эксплуатационные характеристики.

#### Литература

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Шуваев В.Г., Папшев В.А., Шуваев И.В. Инструмент для формирования параметров качества поверхностного слоя деталей при ультразвуковой финишной обработке // СТИН. 2012. № 10. С. 37-40.
3. Шуваев В.Г., Крылова Н.А. Влияние режимов ультразвуковой обработки на свойства цилиндрических поверхностей// Международный симпозиум «Надежность и качество», 2016. № 2. С. 185-186.
4. Шуваев В.Г. Направленное формирование параметров качества поверхностного слоя деталей при ультразвуковой финишной обработке // Международный симпозиум «Надежность и качество», 2015. С.168-169
5. Патент РФ на полезную модель № 143794. Устройство для ультразвуковой финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей вращающихся деталей / В.Г. Шуваев, М.С. Горобец // 27.07.2014. Бюл. № 21.

# КОМБИНАЦИЯ ЭФФЕКТОВ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА И УЛЬТРАЗВУКА В СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Мисоченко А.А.<sup>1,2</sup>, Царенко Ю.В.<sup>3</sup>, Рубаник В.В.<sup>3</sup>, Столяров В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ», Москва

<sup>3</sup> ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларусь», Витебск

Ls3216@yandex.ru

Для производства металлических полуфабрикатов из сплавов с памятью формы традиционно используется термомеханическая обработка, включающая горячее прессование, ротационную ковку, прокатку, холодное волочение. При этом существует проблема одновременного повышения деформируемости и функциональных свойств сплава, поскольку первое достигается за счет высоких температур обработки, что в свою очередь приводит к ухудшению второго. Одним из подходов к решению данной задачи является применение внешних энергетических воздействий, не сопровождаемых воздействием высоких температур. В сплавах с термоупругим мартенситным превращением деформационно-термические методы обработки в сочетании с импульсным током (электропластический эффект) [1] или ультразвуковым воздействием [2] действительно позволяют существенно повысить технологические и эксплуатационные свойства, однако механизм такого воздействия недостаточно изучен. Кроме того, интерес представляет совместное действие обоих эффектов. Например, для чистой меди было показано, что комбинация электропластического (ЭПЭ) и акустопластического (АПЭ) эффектов, может оказывать заметное влияние на дислокационную подвижность и деформационное поведение материала [3]. В этой работе было так же показано, что совместное действие ЭПЭ и АПЭ меньше, чем сумма эффектов по отдельности и зависит от фазового состояния материала.

Цель настоящей работы – сравнительное исследование механического поведения при растяжении и волочении сплавов, проявляющих эффект памяти формы, Ti-50,4ат.%Ni и Ti-50,7ат.%Ni в условиях воздействия внешних электроимпульсного и/или ультразвукового полей.

Объект исследования – проволока с крупнозернистой (80 мкм) аустенитной структурой из сплава Ti-Ni застехиометрического состава. При растяжении импульсный ток и ультразвуковые колебания в различной последовательности вводили в образец на разных стадиях деформации (упругой, квазиупругой, упрочняющей) и фиксировали величину ЭПЭ или АПЭ эффекта.

Эксперимент вели по двум маршрутам:

а) исходные образцы в виде проволоки из сплава Ti-50,4ат.%Ni диаметром 1,38 мм были предварительно подвергнуты волочению с УЗО со степенью деформации на 24%; частота УЗО - 18 кГц, амплитуда смещений 15 мкм, скорость волочения 50 мм/с. Следующим этапом было растяжение с током (режим одиночных импульсов, плотность тока  $j=500 \text{ A/mm}^2$ , длительность импульса  $\tau=100 \text{ мкс}$ , интервал между импульсами  $\sim 10 \text{ с}$ ). Аналогичный эксперимент провели на той же проволоке, но предварительно волоченой без УЗО.

б) исходные образцы в виде прутков из сплава Ti-50,7ат.%Ni диаметром 4 мм были предварительно прокатаны с током (плотность тока  $j=100 \text{ A/mm}^2$ , длительность  $\tau=100 \text{ мкс}$ , скважность 10) до деформации  $e=1,2$ , затем подвергнуты УЗО (частота 18 кГц, амплитуда смещения 25 мкм).

Схемы волочения с УЗО и растяжения с током представлены на рисунках 1 и 2.

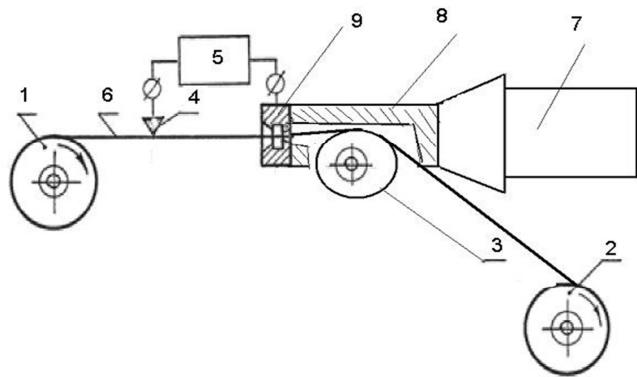


Рис. 1. Устройство волочения и воздействия на проволоку ультразвуковых колебаний:  
1-отдающий барабан, 2 – тянущее устройство, 3 – направляющий ролик, 4 – контактное  
устройство, 5 – генератор электрических импульсов, 6 – обрабатываемая проволока,  
7 – ультразвуковой преобразователь, 8 – волновод, 9 – фильтра

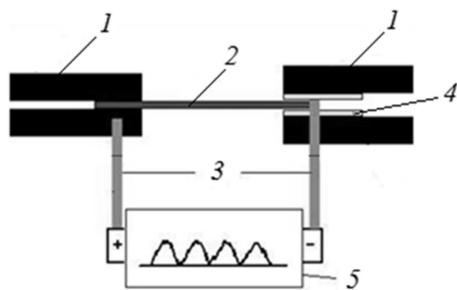


Рис. 2. Схема подвода тока и закрепления образца в установке для растяжения  
ИР 5081-20: 1 – захваты; 2 – образец; 3 – шины для подвода тока; 4 – изоляционный материал;  
5 – генератор импульсов тока

Результаты эксперимента по маршруту *a* представлены на рисунке 3. Наличие импульсов тока приводит к резкому снижению напряжений в виде скачка вниз, однако величина скачка составляет 65-70 МПа и не зависит от предварительной обработки ультразвуком. Видно, что предварительное волочение с УЗО не оказывает влияния на напряжение до разрушения заготовок (1600 МПа на рис.3а и 3б), однако повышает относительное удлинение (технологический запас пластичности): при растяжении с током без предварительной УЗО относительное удлинение составляет около 6% (рис. 3а); с предварительной УЗО – 8% (рис. 3б).

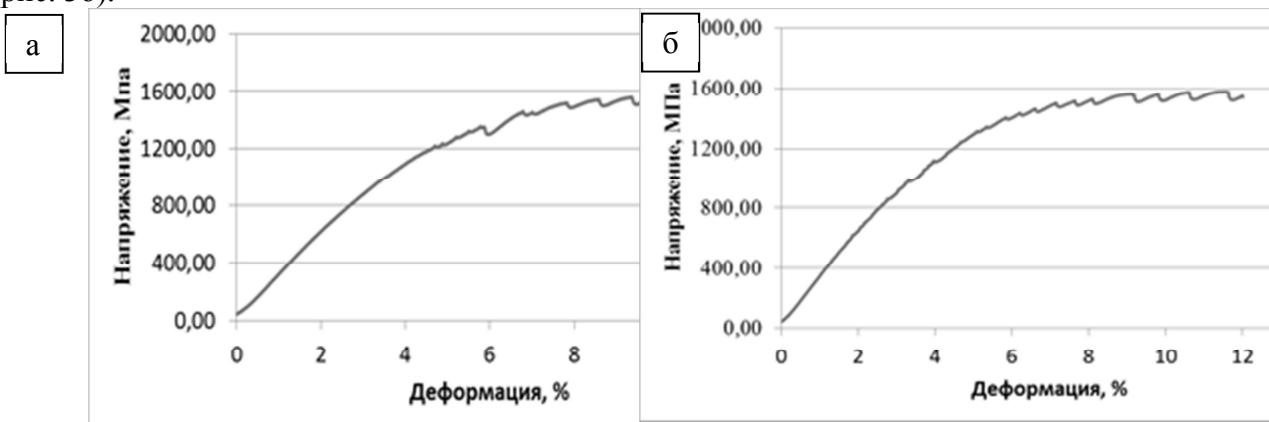


Рис. 3. Зависимости «напряжение-деформация» при растяжении с одиночным импульсным  
током сплава Ti-50,4ат.%Ni после волочения: а) после предварительного волочения без УЗО;  
б) подвергнутого предварительному волочению с УЗО.

Эксперимент по маршруту *b* показал невозможность волочения с УЗО образцов, деформированных прокаткой с током до  $e=1,2$ : образцы разрушались уже на первых этапах волочения. В этой связи было принято решение выполнять УЗО без волочения с целью снижения механических напряжений. Амплитуда напряжений составляла 100 МПа, а время экспозиции 3 мин.

На рисунке 4 показаны ДСК кривые образцов сплава Ti-50,7ат.%Ni после прокатки с током и последующей УЗО. Из рисунка 4а (кривая 1) видно, что после прокатки наблюдается 2 пика энергии при температурах 350 (экзотермический) и 550°C (эндотермический), которые исчезают после повторного нагрева образца (кривая 2). Первый пик, вероятно, связан со снятием структурных напряжений в процессе нагрева, второй – с рекристаллизацией.

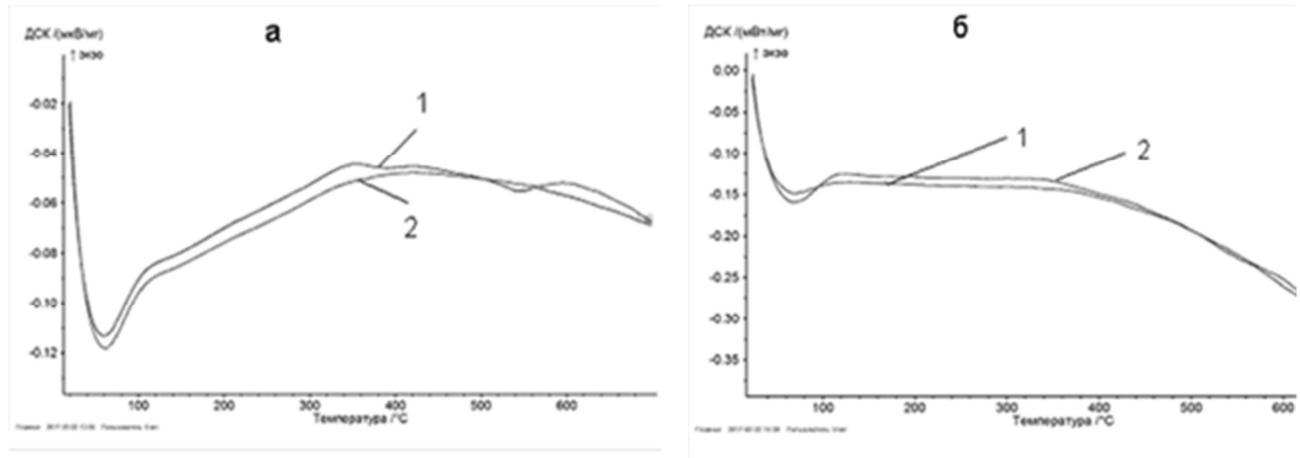


Рис. 4. Кривые ДСК образцов сплава Ti-50,7ат.%Ni после прокатки с током до  $e=1,2$  (а) и последующей УЗО (б); кривые 1 – первый цикл нагрева, кривые 2 – повторный нагрев

После ультразвуковой обработки (рисунок 4б) кривые ДСК после 1 и 2 цикла нагрева практически совпадают, что свидетельствует о достижении в материале под действием ультразвуковой обработки эффекта, аналогичного термическому (снятие внутренних напряжений).

Таким образом, в работе исследовано влияние последовательных комбинаций «волочение с УЗО + растяжение с током» и «прокатка с током + волочение с УЗО». Показано, что ЭПЭ в сплаве Ti-50,4ат.%Ni не зависит от предварительной обработки волочением с ультразвуком, однако УЗО приводит к повышению ресурса технологической пластичности материала. Не выявлено преимуществ в деформационной способности сплава Ti-50,7ат.%Ni по схеме «прокатка с током + волочение с УЗО». Кратковременная Ультразвуковая обработка предварительно деформированных с током образцов приводит к снятию внутренних напряжений, и может быть применена в качестве замены длительной термической обработки.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-58-00152) и БРФФИ (проект Т16Р-152).*

#### Литература

- Потапова А.А., Столяров В.В., Бондарев А.Б., Андреев В.А. Исследование возможности применения электропластической прокатки для получения прутков из сплава TiNi // Машиностроение и инженерное образование, 2, 2012, 33-38.
- Rubanik V.V., Rubanik V.V. jr., Dorodeiko V.G., Miliukina S.N., Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti-50,4 at.%Ni Alloy // Mater. Sci. Forum, V. 738-739 (2013) 362–366.
- A.V. Kozlov, B.N. Mordyuk, A.V. Chernyashevsky, On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects // Mater. Sci.&Eng.A190 (1995) 75-79.

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ В ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ НЕРАВНОВЕСНЫХ ГРАНИЦ ЗЕРЕН

Мурзаев Р.Т., Назаров А.А., Бачурина Д.В.

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа  
murzaevrt@gmail.com

Ультразвуковая обработка (УЗО) значительно влияет на структуру и свойства кристаллических материалов [1]. Экспериментально установлено, что результат может быть совершенно разным в зависимости от амплитуды (мощности) и частоты ультразвука. В области низких амплитуд колебаний, когда дислокации не могут сдвинуться с места, происходит только микропластическая деформация [2]. В случае умеренно высоких амплитуд, когда дислокации становятся подвижными, может происходить их перераспределение и аннигиляция. Наблюдаются процессы релаксации внутренних напряжений [1,3]. При ультразвуковом воздействии с высокими амплитудами, превышающими динамический предел текучести, начинается интенсивная генерация дислокаций. Это способствует формированию ячеистой структуры [4], упрочнению материала [1], наноструктурированию поверхности [5].

Работ, в которых проводилось численное моделирование ультразвукового воздействия на дислокационные системы, довольно мало. В работе [6] было показано, что воздействие ультразвука на дислокационные границы, формирование которых не завершено из-за действия сил сухого трения, приводит к формированию совершенных границ, не создающих дальнодействующих напряжений. В работе [7] методом моделирования было исследовано поведение системы краевых дислокаций в монокристаллах.

Общим недостатком вышеперечисленных работ по моделированию является то, что в них моделируется воздействие ультразвука на дислокации одной системы скольжения. При этом эффекты, связанные со взаимодействием дислокаций, движущихся в пересекающихся плоскостях скольжения, оказываются недоступными для рассмотрения. В настоящей работе при помощи компьютерного моделирования исследуется релаксация под действием ультразвука неупорядоченной системы дефектов, состоящей из дислокаций, способных двигаться по трем некомпланарным плоскостям скольжения в отдельно взятом модельном зерне поликристалла.

Для проведения моделирования было выбрано зерно квадратной формы. Для имитации неравновесного состояния границ зерен, характеризующегося дальнодействующими полями напряжений, на вершинах зерна были помещены стыковые клиновые дисклинации, образующие квадрупольную конфигурацию (см. рис. 1). В зерне действуют три плоскости скольжения, расположенные под углом  $60^\circ$  друг к другу (рис. 1). Начальные координаты краевых дислокаций в пределах рассматриваемого зерна задавались случайным образом. Для простоты считалось, что на каждой плоскости скольжения находится равное число дислокаций; кроме того, число положительных и отрицательных дислокаций (дислокаций с противоположными знаками вектора Бюргерса) в пределах каждой плоскости также одинаково. Рассматривалось только скольжение дислокаций без учета переползания. В процессе моделирования число дислокаций в системе остается всегда постоянным. Возможные реакции слияния, которые могут происходить между дислокациями, движущимися в разных плоскостях скольжения и встречающимися в одной

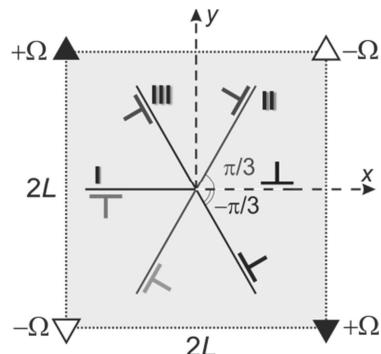


Рис. 1. Схематическое изображение модельного квадратного зерна с тремя плоскостями скольжения.

линии, также не рассматривались. Все четыре границы в зерне считались непроницаемыми для дислокаций, что соответствует случаю большеугловых границ зерен.

Уравнение движения для  $i$ -ой дислокации рассматриваемой системы может быть записано в виде:

$$\frac{dx_i}{dt} = B(\tau_{us}(t) + \tau_{xy}^{d-d}(x, y) + \tau_{xy}^{dq}(x, y))^m \quad (1)$$

Выражение в скобках представляет собой сумму сдвиговых напряжений, действующих на  $i$ -ю дислокацию в плоскости скольжения вдоль направления вектора Бюргерса. Первое слагаемое связано с действием внешнего знакопеременного напряжения. Второе слагаемое является суммой сдвиговых напряжений, действующих на  $i$ -ю дислокацию со стороны всех остальных дислокаций системы. Третье слагаемое представляет собой сдвиговое напряжение, создаваемое дисклинационным квадрупольем [9].

Система дифференциальных уравнений (1) решалась с помощью численных методов. При этом использовались безразмерные параметры для расстояния  $\tilde{x} = x \cdot \omega / B\tau_0^m$  и времени  $\tilde{t} = t \cdot \omega$ , подстановка которых в выражение (1) дает

$$\frac{d\tilde{x}_i}{d\tilde{t}} = \left[ S_i \sin \tilde{t} + \frac{1}{K} \cdot \tilde{\tau}_{ji}^{d-d}(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j, \tilde{y}_i - \tilde{y}_j) + Q \cdot \tau_{xy}^{dq}(\tilde{x}, \tilde{y}) \right]^m, \quad (2)$$

где  $S_i = \pm 1$  в зависимости от знака дислокации. Из выражения (2) видно, что скорость движения  $i$ -ой дислокации зависит от параметров  $K = B\tau_0^{m+1} / Db\omega$ , который отвечает за взаимодействие между дислокациями и пропорционален амплитуде внешнего знакопеременного напряжения, и  $Q = D\Omega / \tau_0$ , который отвечает за взаимодействие дислокаций с дисклинационным квадрупольем и определяет степень неравновесности границ зерен.

В результате компьютерного моделирования установлено, что действие внешнего знакопеременного поля вызывает значительную перестройку дислокационной структуры, в результате чего дислокации из тела зерна перемещаются в границы зерен. Расчеты показывают, что степень релаксации системы, которая напрямую связана с перестройкой дислокационной структуры, сильно зависит от значений параметров  $K$  и  $Q$ . На рис. 2 представлена зависимость шпера напряжений от времени моделирования для различных значений  $K=0.5$  и  $Q=0.5$ . Поскольку значения шпера зависят от данного конкретного распределения дислокаций в системе, то в этом случае для «чистоты» эксперимента все расчеты проводились для одной и той же системы, составленной из 300 случайно распределенных дислокаций. На рис. 3 показаны конечные положения дислокаций после ультразвукового воздействия в течение 5000 периодов колебаний.

Результаты моделирования показывают, что среднеквадратичный след тензора напряжений, усредненный по площади рассматриваемого зерна, в данной модели с тремя плоскостями скольжения может уменьшаться в пределах от 7 до 30%. Это близко к тем средним значениям (4-20%), которые были получены для случая дислокаций одной плоскости скольжения [8]. Полученный результат моделирования также удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными работ [10], в которых рентгеноструктурным анализом определены среднеквадратичные упругие микродеформации в ультрамелкозернистых металлах, подвергнутых УЗО с различными амплитудами, и получено изменение микродеформаций в пределах от 10 до 47%.

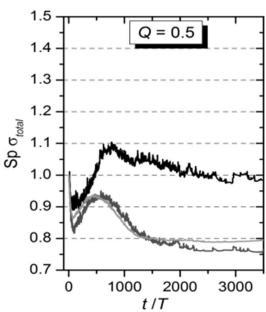


Рис. 2. Зависимость изменения относительного значения среднеквадратичного следа напряжений, рассчитанная для одной и той же системы, от времени ультразвукового воздействия

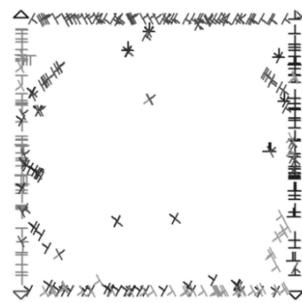


Рис. 3. Расположение дислокаций в расчетной ячейке после ультразвукового воздействия в течение 5000 периодов колебаний при значениях параметров  $K=0.5$  и  $Q=0.5$ .

Таким образом, учет, наряду с «главной» и второстепенных систем скольжения дислокаций, приводит к обнаружению новых процессов структурной перестройки в деформированных материалах, происходящих при УЗО. В частности, взаимодействие между дислокациями различных плоскостей способствует образованию субструктур внутри зерна. Однако рассмотренная модель все еще является неполной, так как не принимает во внимание такие важные процессы, как генерация дислокаций, их переползание, дислокационные реакции, в том числе их аннигиляция и др. Развитие моделирования с учетом указанных факторов позволит глубже понять происходящие при ультразвуковой обработке процессы и целенаправленно влиять на структуру и механические свойства материалов.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

#### Литература

- Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Мн.: Наука и техника, 1973. 263 с.
- Ниблетт Д., Уилкс Дж. Внутреннее трение в металлах, связанное с дислокациями // УФН. 1963. Т. 80. № 1. С. 125187.
- Гиндин И.А., Волчок О.И., Неклюдов И.М. Релаксация внутренних напряжений в кремнистом железе под действием ультразвуковых колебаний // ФТТ. 1975. Т. 17. № 3. С. 655-657.
- Кулемин, А.В. Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 200 с.
- Astashev V.K., Krupenin V.L., Perevezentsev V.N., Kolik L.V., Andrianov N.A. Properties of surface layers nanostructured by autoresonant ultrasonic turning // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2001. № 40. Р. 463-466.
- Бушуева Г.В., Зиненкова Г.М., Тяпунина Н.А., Дегтярев В.Т., Лосев А.Ю., Плотникова Ф.А. Самоорганизация дислокаций в ультразвуковом поле // Кристаллография. 2008. № 53. С. 507-512.
- Абрамов О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. М.: Наука. 2000. 312 с.
- Bachurin D.V., Murzaev R.T., Baimova J.A., Samigullina A.A., Krylova K.A. Ultrasound influence on behavior of disordered dislocation systems in a crystal with non-equilibrium grain boundaries // Letters on materials. 2016. № 6. Р. 183-188.
- Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинации в кристаллах. Л.: Наука, 1986. 224 с.
- Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Сергеев С.Н., Жиляев А.П., Назаров А.А., Загидуллина Ю.Р., Пархимович Н.Ю., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость ультрамелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2. С. 85-90.

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ6, ПОДВЕРГНУТОГО РАВНОКАНАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ ПРЕССОВАНИЮ

Мухаметгалина А.А.<sup>1,2</sup>, Самигуллина А.А.<sup>2</sup>, Назаров А.А.<sup>2</sup>, Мурзинова М.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Башкирский государственный университет, Уфа*

<sup>2</sup>*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа*

a.mukhametgalina@mail.ru

## *Введение*

Высокие прочностные характеристики ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), делают их перспективными для использования в качестве конструкционных материалов. Титановые сплавы системы Ti-Al-V, широко применяемые в современном авиа- и машиностроении, были одними из первых материалов, в которых деформационными способами была сформирована УМЗ структура. Известно, что измельчение структуры в полуфабрикатах из сплава ВТ6 приводит к повышению прочности, предела выносливости, износостойкости, однако несколько снижает пластичность, ударную вязкость, вязкость разрушения [1, 2]. Снижение этих свойств является характерным для УМЗ материалов, полученных ИПД, так как их структура обладает значительными внутренними напряжениями, микроискажениями решетки, высокой плотностью дефектов [3]. Поэтому в последнее время активно развиваются различные способы физического воздействия на их структуру с целью улучшения механических свойств.

Одним из таких способов является ультразвуковая обработка (УЗО). Интерес к УЗО как к одному из методов обработки УМЗ металлов связан с тем, что она способствует ускорению процесса релаксации остаточных напряжений, воздействуя на дефектную структуру материала [4, 5]. Высокочастотные колебания приводят к повышению пластичности материала при его деформировании, в частности, путем сверхпластической деформации, что позволяет значительно снизить требуемые усилия и энергозатраты в процессе обработки [6]. В работах [7, 8] была исследована зависимость механических свойств никеля, подвергнутого равноканальному угловому прессованию (РКУП), от амплитуды ультразвука. Было показано, что эта зависимость является немонотонной, и существует амплитуда ультразвука, при которой все свойства достигают максимума.

Хотя в последние годы проведена значительная работа, направленная на понимание особенностей влияния УЗО на микроструктуру и механические свойства УМЗ металлов, имеющиеся данные во многом являются неполными. Кроме того, большинство исследований было проведено на преимущественно однофазных и имеющих кубическую решетку материалах. Между тем, закономерности, установленные для таких металлов и сплавов, не могут быть непосредственно перенесены на титан с менее симметричной гексагональной решеткой и, тем более, на его двухфазные сплавы.

В данной работе проводилось исследование влияния УЗО с различными амплитудами напряжения на механические свойства УМЗ титанового сплава ВТ6, полученного методом равноканального углового прессования.

## *Материал и методика исследований*

В качестве материала исследования использовали титановый сплав ВТ6. Образцы с УМЗ структурой были получены из прутков диаметром 20 мм методом РКУП в оснастке с углом между каналами 120° по маршруту Вс, 6 циклов при T=600°C ( $e \approx 4$ ), и последующим редуцированием (экструзией) до диаметра 14 мм при T=400°C.

Из полученных прутков в поперечном сечении вырезали образцы толщиной 2 мм, которые затем подвергали УЗО с амплитудами напряжений 20, 40, 60, 80 МПа по схеме, описанной в работе [9].

Механические свойства при растяжении определяли на плоских образцах с размерами рабочей части  $2 \times 1 \times 1,5$  мм (не менее двух образцов для каждого состояния). Испытания на растяжение проводили на машине “INSTRON” при комнатной температуре со скоростью деформации 1мм/мин.

Величины внутренних напряжений в первичной  $\alpha$ -фазе определяли по данным, полученным методом РСА на дифрактометре ДРОН-4. Образцы подвергали механической, а затем электролитической полировке для снятия наклепанного поверхностного слоя. Съемка проводилась в пошаговом режиме с шагом  $0,02^\circ$  и временем экспозиции 10 с. Использовали  $\text{CuK}_\alpha$  излучение с фокусировкой по Брегту – Брентано со щелями Соллера на первичном пучке и графитовым кристаллом – монохроматором на дифрагированном пучке. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием программы X-RAY.

### *Результаты эксперимента*

В таблице 1 представлены результаты механических испытаний образцов после каждого режима обработки, а также величины микродеформаций, рассчитанных по данным РСА. УЗО при всех значениях амплитуды сдвигающих напряжений приводят к увеличению предела прочности, при этом относительное удлинение и относительное сужение до разрыва меняется незначительно. Некоторое снижение пластических свойств заметно при амплитуде УЗО 60 МПа. Наименьшее значение среднеквадратической микродеформации по данным РСА соответствует амплитуде ультразвука 40 МПа. При этой же амплитуде наблюдается небольшое увеличение удлинения до разрушения.

Таблица 1. Результаты механических испытаний и РСА.

Режим обработки	Механические свойства образцов ВТ6			$\sqrt{\langle e^2 \rangle}$ , %
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	
РКУП	$953 \pm 9$	$21 \pm 1$	$54 \pm 0,8$	$0.4697 \pm 0.0402$
РКУП+УЗО 20 МПа	1174	20	53	$0.4629 \pm 0.0323$
РКУП+УЗО 40 МПа	$1136 \pm 9$	$24,5 \pm 0,5$	$47,7 \pm 1$	$0.3358 \pm 0.0629$
РКУП+УЗО 60 МПа	$1060 \pm 3$	$17,5 \pm 1,5$	$41 \pm 1$	$0.4462 \pm 0.0402$
РКУП+УЗО 80 МПа	$1093 \pm 8$	$23,5 \pm 0,5$	$50 \pm 2$	$0.4827 \pm 0.0503$

Для всех состояний были также рассчитаны доли первичной  $\alpha$ -фазы и  $\beta$ -фазы, которые составили 25 и 8-9% соответственно для всех состояний. Зависимость среднеквадратической микродеформации от амплитуды УЗО коррелирует с подобной зависимостью для УМЗ никеля марки НП2, полученной в работе [9]. Это может говорить о том, что в случае двухфазного сплава ВТ6 ультразвуковая волна взаимодействует с элементами структуры по тем же механизмам, что и в случае однофазного материала. УЗО способствует только движению и перераспределению дислокаций и их скоплений и при данных амплитудах не приводит к изменению фазового состава сплава.

### *Выводы*

В работе получена зависимость среднеквадратической микродеформации от амплитуды УЗО, которая согласуется с результатами, полученными для однофазного сплава НП2.

Результаты проведенного эксперимента пока не позволяют говорить о значительном влиянии УЗО на механические свойства двухфазного сплава ВТ6, поскольку эти свойства определяются не только распределением дислокаций в материале, но также его фазовым

составом, степенью предшествующей деформации и т.д. В продолжение данной работы будут проведены также механические испытания в продольном направлении образцов после РКУП и УЗО по схеме, отличающейся от использованной ранее. Ожидается, что в данном случае величины механических свойств будут более заметно зависеть от амплитуды УЗО.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

#### Литература

1. Малышева С.П., Мурзинова М.А., Жерецбов С.В., Салищев Г.А. Механические свойства ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 // Перспективные материалы. Специальный выпуск (12). 2011. С. 316-320.
2. Саркеева А.А., Лутфуллин Р.Я., Круглов А.А., Астанин В.В. Влияние структуры на механическое поведение титанового сплава ВТ6 при ударном нагружении // Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 99-102.
3. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured Materials. In: Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, Ed. Goddard W., Brenner D., Lyshevski S., Iafrate G., CRC Press. 2003. Ch. 22. P. 22-1-22-41.
4. Бачурин Д.В., Мурзаев Р.Т., Баимова Ю.А., Самигуллина А.А., Крылова К.А. Влияние ультразвука на поведение неупорядоченных дислокационных систем в кристалле с неравновесными границами зерен // Письма о материалах. 2016. Т.6. №3. С.183-188.
5. Назаров А.А., Ханнанов Ш. Х. Ультразвуковая стимуляция процесса полигонизации // Физ. хим. обр матер. 1986. № 4. С. 109-114.
6. Мышляев М.М., Шпейzman В.В., Клубович В.В. и др. Изменение характеристик сверхпластической деформации алюминий-литиевого сплава под действием ультразвуковых колебаний // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 10. С. 1986-1991.
7. Самигуллина А.А., Царенко Ю.В., Рубаник В.В.и др. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистого никеля, полученного равноканальным угловым прессованием // Письма о материалах. 2012. Т. 2. Вып. 4. С. 214-217.
8. Samigullina A.A., Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V. and Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // Rev. Adv. Mater. Sci. 2014. No 1/2. Vol. 39. P. 48-53.
9. Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Сергеев С.Н. и др. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость ультрамелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2. С. 85-90.

# РАСЧЕТ ДВУХАМПУЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЛНОВОДА

Мухаметгалина А.А.<sup>1,2</sup>, Назаров А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Башкирский государственный университет, Уфа

<sup>2</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа  
a.mukhametgalina@mail.ru

## Введение

Ультразвуковое воздействие является одним из перспективных методов обработки ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, полученных интенсивной пластической деформацией, способствующих улучшению комплекса их механических свойств, в частности, повышению пластичности и ударной вязкости [1,2]. При этом, как показывают эксперименты, эффект воздействия ультразвука зависит от амплитуды напряжений [2]. Между тем, при обработке в обычно используемом для ультразвуковой обработки (УЗО) режиме стоячей волны амплитуда напряжений вдоль полуволнового волновода постоянного сечения меняется по синусоидальному закону. Соответственно, изменения микроструктуры, а, следовательно, и свойств материала вдоль цилиндрического полуволнового образца распределены неравномерно, что ограничивает исследователя в выборе размеров образцов и методов исследования. Если подобрать форму волновода таким образом, чтобы амплитуда напряжений была постоянной в некоторой его области, можно увеличить зону равномерного воздействия ультразвука данной амплитуды и получить образец большего размера с необходимыми свойствами.

В качестве такого волновода предлагается использовать стержень переменного сечения на основе ампульного концентратора, у которого в гауссовой области амплитуда деформаций и напряжений постоянна [2]. Соединив две высокоамплитудные части такого концентратора между собой широкими концами, можно получить инструмент для УЗО с удвоенной длиной гауссовой области, в которую можно поместить обрабатываемый образец. В работе представлен расчет геометрических параметров такого инструмента.

## Методика расчета

Рассмотрим двухампульный волновод с длиной  $2l$ , схематически представленный на рис. 1 а. Пренебрегая затуханием ультразвука и учитывая симметричность волновода, можно произвести расчет для одной его половины подобно тому, как это сделано в работе [3] для высокоамплитудной части ампульного концентратора.

Если вдоль стержня происходят гармонические колебания, описываемые законом  $\xi(x,t) = u(x)\exp(i\omega t)$ , где  $u(x)$  - амплитуда колебаний в сечении с координатой  $x$  и  $\omega=2\pi f$  - угловая частота колебаний, уравнение для амплитуды колебаний принимает вид

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d}{dx}(\ln A)\frac{du}{dx} + \frac{\omega^2}{c^2}u = 0, \quad (1)$$

где  $c = \sqrt{E/\rho}$  - скорость звука в стержне,  $A=A(x)$  - площадь сечения с координатой  $x$ . Вводя безразмерные координаты, смещения и частоту  $X = x/l$ ,  $U(X) = u(x)/l$ ,  $\Omega^2 = \omega^2 l^2 / c^2 = (2\pi l / \lambda)^2$  соответственно, уравнение (1) можно записать в виде

$$U'' + \frac{d(\ln A)}{dX}U' + \Omega^2U = 0, \quad (2)$$

или, после разделения переменных, в виде

$$\frac{d(\ln A)}{dX} = -\frac{U'' + \Omega^2U}{U'}. \quad (3)$$

Это уравнение решается при граничных условиях  $U(0) = 0$ ,  $U'(1) = 0$ ,  $U''(1) + \Omega^2U(1) = 0$ . Область координат  $[0, l]$  делится на два участка, в которых решение ищется в разном виде. В

области  $0 \leq X < X_t$ , называемой гауссовой, деформация предполагается равномерной:  $U' = \varepsilon_m$  (см. рис. 1 б), откуда  $U(X) = \varepsilon_m X$ . Во второй области  $X_t \leq X \leq 1$  решение ищется в виде полинома третьей степени, непрерывного вместе с первой и второй производными в точке  $X = X_t$ , который удовлетворяет условию  $U'(1) = 0$ . Расчет приводит к следующему выражению:

$$U(X) = -\frac{\varepsilon_m (X - X_t)^3}{3(1 - X_t)^2} + \varepsilon_m X. \quad (4)$$

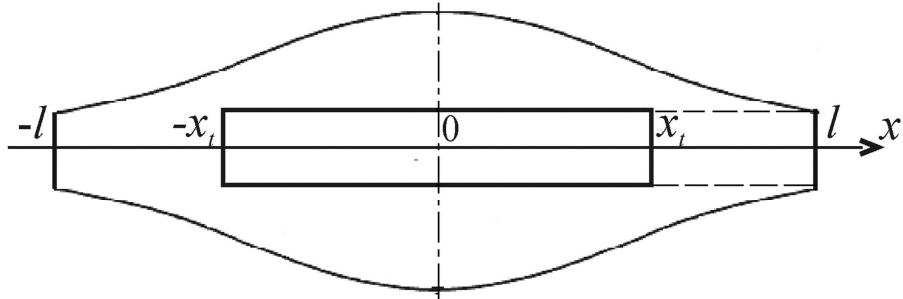


Рис.1. Принципиальная схема двухампульного волновода

Подставляя полученные выражения в уравнение (3), можно получить закон изменения площади сечения, определяющий геометрическую форму волновода:

$$\frac{A(X)}{A(0)} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{2}\Omega^2 X^2\right) & \text{при } 0 \leq X \leq X_t, \\ \exp\left\{-\frac{1}{2}\Omega^2 \left[X_t^2 + \frac{1}{3}(X - X_t)^2\right] - 2\left(1 - \frac{4}{3\varphi^2}\right) \ln\left(1 + \frac{X - X_t}{1 - X_t}\right)\right\} & \text{при } X_t \leq X \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве свободно варьируемого безразмерного параметра, определяющего характеристики волновода, удобно ввести величину

$$\varphi = \frac{V_m}{c\varepsilon_m} = \frac{\omega u_m}{c\varepsilon_m} = \frac{\omega l}{c} \frac{U(1)}{\varepsilon_m} = \Omega \frac{U(1)}{\varepsilon_m}, \quad (6)$$

через которую определяются другие параметры:

$$\Omega = \varphi + \frac{2}{3\varphi} = \frac{2\pi l}{\lambda}, \quad X_t = 1 - \frac{2}{\Omega\varphi} \quad (7)$$

Основываясь на принципе симметрии, к рассмотренной высокоамплитудной части можно присоединить ее зеркальное отражение и получить теперь двухампульный волновод (рис. 1), который не будет усиливать колебаний (амплитуда на входе  $u(-l)$  равна амплитуде на выходе  $u(l)$ ), но будет обеспечивать равномерное распределение амплитуды деформаций и напряжений на отрезке  $-x_t < x < x_t$ , то есть, на участке, в котором можно разместить образец длиной  $2x_t$ .

Используя соотношения (7) и (6), можно получить следующие выражения для длины участка с равномерным напряжением и соответствующего значения амплитуды напряжений:

$$2x_t = 2\left(1 - \frac{6}{2 + 3\varphi^2}\right), \quad \sigma_m = E\varepsilon_m = E\left(1 + \frac{2}{3\varphi^2}\right) \frac{u(l)}{l}. \quad (8)$$

#### *Анализ выражений и расчет волновода*

Из выражений (8) видно, что с увеличением параметра  $\varphi$  длина участка с равномерным напряжением увеличивается, однако при этом уменьшается амплитуда напряжений. Следовательно, для подбора геометрических характеристик волновода необходим

компромиссный выбор этого параметра, а также материала волновода, основанный на требованиях к образцам и режимам УЗО.

В качестве примера приведем расчет характеристик волновода из стали 45, взяв для нее  $\rho = 7826 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $E = 200 \text{ ГПа}$  (ГОСТ 1050-88), и титанового сплава ВТ6, взяв  $\rho = 4430 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $E = 115 \text{ ГПа}$  (ГОСТ 18807-91). Для частоты ультразвука  $f = 19,9 \text{ кГц}$  длина волны в стержнях из этих материалов  $\lambda = (1/f)\sqrt{E/\rho}$  равна соответственно  $\lambda = 254 \text{ мм}$  и  $\lambda = 256 \text{ мм}$ . Будем задавать значения параметра  $\varphi$  и диаметра волновода на концах  $d(l) = d(-l)$ . Максимальный диаметр рассчитывается из соотношения  $d(0) = d(l)\sqrt{A(0)/A(1)}$  в соответствии с выражением (5).

Результаты расчетов для значений диаметра  $d(\pm l) = 30 \text{ мм}$ , амплитуды колебаний концов волновода  $u(\pm l) = 1 \text{ мкм}$  и четырех значений параметра  $\varphi$  приведены в таблице.

Таблица. Характеристики двухампульного волновода из стали и титанового сплава

$\varphi$	$d(0)$ , мм	Сталь 45			ВТ6		
		$2l$ , мм	$2x_l$ , мм	$\sigma_m$ , МПа	$l$ , мм	$2x_l$ , мм	$\sigma_m$ , МПа
1,4	46,6	151,8	36,2	3,53	153,0	36,4	2,00
1,5	50,7	157,2	49,4	3,30	158,4	49,8	1,88
1,6	55,2	163,2	62,0	3,09	164,4	62,6	1,76
1,7	60,3	169,2	74,0	2,90	170,6	74,6	1,66

Изменяя амплитуду колебаний, вводимых с одного конца волновода, можно достигать заданных значений амплитуды напряжений на образце, вставленного в гауссовой части волновода. Для расширения интервала достижимых амплитуд напряжений можно использовать предварительное усиление колебаний с помощью обычного ступенчатого концентратора с радиальным переходом. При этом параметр  $\varphi$  можно выбрать так, чтобы длина участка равномерного УЗО была достаточной для проведения дальнейших испытаний, например, для испытаний растяжением.

Сопоставим напряжение, достигаемое в двухампульном волноводе, с максимальной амплитудой в пучности напряжений равномерного цилиндра длиной  $2l = \lambda/2$ , которая равна  $\sigma_0 = Eku(l) = 2\pi Eu(l)/\lambda = E(\pi/2)u(l)/l$ . Для значения  $\varphi = 1,4$   $\sigma_m / \sigma_0 \approx 0,85$ , то есть, при одной и той же амплитуде колебаний в двухампульном волноводе достигается значение напряжения, примерно на 15% более низкое, чем максимальное напряжение в стержне постоянного сечения.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

#### Литература

- Самигуллина А.А., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. и др. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистого никеля, полученного равноканальным угловым прессованием // Письма о материалах. 2012. Т. 2. Вып. 4. С. 214-217.
- Samigullina A.A., Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V., Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // Rev.Adv.Mater.Sci. 2014. No 1/2. Vol. 39. P. 48-53.
- Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч. Б. - М.: Мир, 1967.

# РАЗБОРКА РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Неверов А.Н.

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

Около 60 % трудоемкости разборочных работ при ремонте приходится на резьбовые соединения. До сих пор, однако, ультразвук мало применяется при разборке резьбовых соединений, хотя именно они в основном повреждаются в процессе разборки. По-видимому, этому мешает отсутствие исследований по этой теме.

Целью настоящей работы было исследование влияния ультразвуковых колебаний на усилие разборки резьбовых соединений.

Поскольку коэффициент трения покоя оказывается больше коэффициента трения скольжения, зачастую для разборки резьбового соединения оказывается достаточным даже небольшого кратковременного относительного смещения разбираемых деталей. Легко показать, что момент, необходимый для разборки соединения силой  $F_0$ , определяется соотношением (без учета трения на торце болта)

$$M_{\text{откр}} = 0,5F_0d_2 \operatorname{tg}(\rho_{\text{n}} - \psi) \quad , \quad (1)$$

где  $d_2$  – средний диаметр резьбы,  $\psi$  – угол подъема витков резьбы,  $\rho_{\text{n}}$  – угол трения покоя между витками болта и гайки.

Воздействие тангенциальной силы  $F_0$  может привести к повреждению болта как из-за закручивания хвостовика, так и вследствие воздействия срезающих нагрузок в теле болта. Поэтому величина этой силы должна быть минимальной, а в идеальном случае – равной нулю, т.к. при самооткручивании внутренние напряжения в болте не возникают.

Рассмотрев многоугольник сил в витках резьбы при воздействии продольных ультразвуковых гармонических колебаний  $F=F_m \cos \omega t$ , где  $F$  – текущее значение переменной силы,  $F_m$  – ее амплитуда,  $\omega$  – круговая частота,  $t$  – время, можно показать, что минимальное значение отвинчивающей силы снижается до

$$F_{yz} = F_0 \left( 1 - \frac{F_m}{F_0} \operatorname{tg} \psi \right), \quad (1)$$

где  $F_0$  – минимальное значение отвинчивающей силы без воздействия ультразвука.

Условие (1) является необходимым, но не достаточным для разборки резьбового соединения. Дело в том, что смещение резьбовых поверхностей болта и гайки будет необратимым лишь тогда, когда оно превосходит предварительное смещение  $\delta$ . Не обсуждая его природу, заметим, что смещение, большее  $\delta$ , будет необратимым.

Из (1) получаем условие самооткручивания резьбового соединения:

$$F_m = F_0 \operatorname{ctg} \psi \quad (2)$$

Оценим величину смещения в резьбовой паре за время  $2\Delta t$ , в течение которого эффективная сила  $F_{yz}$  положительна. Для определения интервала  $2\Delta t$  необходимо заменить в формуле (1)  $F_m$  на  $F_m \cos \omega \Delta t$ , где  $\omega$  – циклическая частота колебаний, и приравнять выражение в скобке (1) нулю. Проделав это, получаем

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \arccos \left( \frac{F_0}{F_m} \operatorname{tg} \psi \right). \quad (3)$$

Смещение  $\Delta s$  и скорость  $v$  за указанный временной интервал можно вычислить при помощи известных соотношений динамики материальной точки. В результате находим

$\Delta s \approx \frac{F_0}{m} (\Delta t)^2 \left( \frac{F_m}{F_0} \operatorname{ctg} \psi - 1 \right)$ , где  $m$  – масса болта, а достаточное условие разборки принимает вид:

$\Delta s > \delta$ ,  $\Delta t$  определяется условием (3).

Экспериментальное исследование влияния ультразвуковых колебаний на усилие разборки резьбовых соединений проводилось на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1. Выходная полуволна колебательной системы и исследуемое резьбовое соединение изображены на рис. 2.

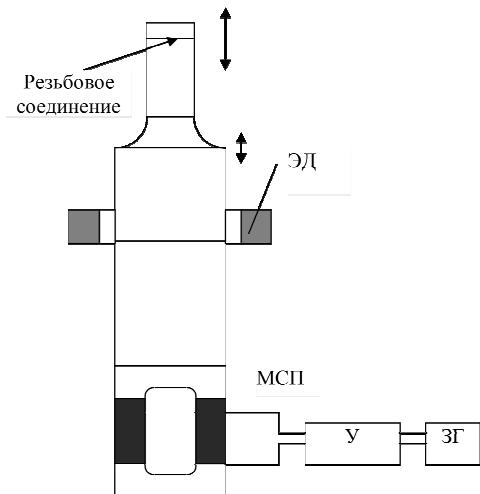


Рис. 1. Блок-схема установки для экспериментального исследования влияния ультразвуковых колебаний на усилие разборки резьбовых соединений

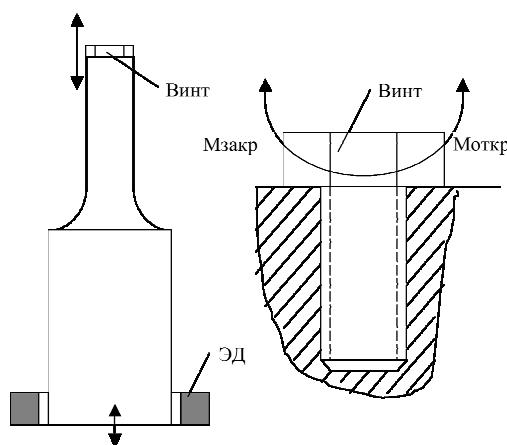


Рис. 2. Выходная полуволна колебательной системы и исследуемое резьбовое соединение

Гармонический сигнал задающего генератора ЗГ усиливался усилителем У. В качестве источника упругих колебаний использовался магнитострикционный преобразователь МСП. К рабочему торцу преобразователя припаивался полуволновый волновод, к которому резьбовым соединением M10×1 присоединялся винт. Момент затяжки создавался и контролировался стандартным динамометром. Собственные частоты преобразователя и волновода составляли  $22,45 \pm 0,25$  кГц. Винт при расчете можно было аппроксимировать сосредоточенной массой. Волновод крепился к неподвижным частям экспериментальной установки в узле продольных смещений. Вся колебательная система располагалась вертикально.

Винт стягивался с волноводом определенным моментом Мзакр (без воздействия ультразвука), после чего на резьбовое соединение воздействовали крутящим откручивающим моментом и продольными колебаниями ультразвуковой частоты. Колебательная система возбуждалась на резонансной частоте, определявшейся по максимуму выходного сигнала в отсутствие откручивающего момента. Амплитуда колебаний оценивалась по сигналу электродинамического датчика ЭД, предварительно проградуированного при помощи ультразвукового бесконтактного виброметра.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости момента откручивания (в Н·м) от амплитуды колебаний волновода (в мкм) при различных моментах закручивания (в Н·м).

Наложение ультразвуковых колебаний приводит к снижению момента откручивания, которое увеличивается с ростом величины возбуждающего сигнала и прямо пропорционально амплитуде колебаний  $A$ . Это же следует и из выражения (1), поскольку амплитуда колебательной силы, действующей в резьбовом соединении,  $F_m = m\omega^2 A$ , где  $m$  - масса болта.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости амплитуды ультразвуковых колебаний, при которой происходит самооткручивание резьбового соединения, от усилия его закручивания. График подтверждает условие (2), поскольку  $F_m$  пропорциональна амплитуде  $A$ , Мзакр – силе  $F_0$ .

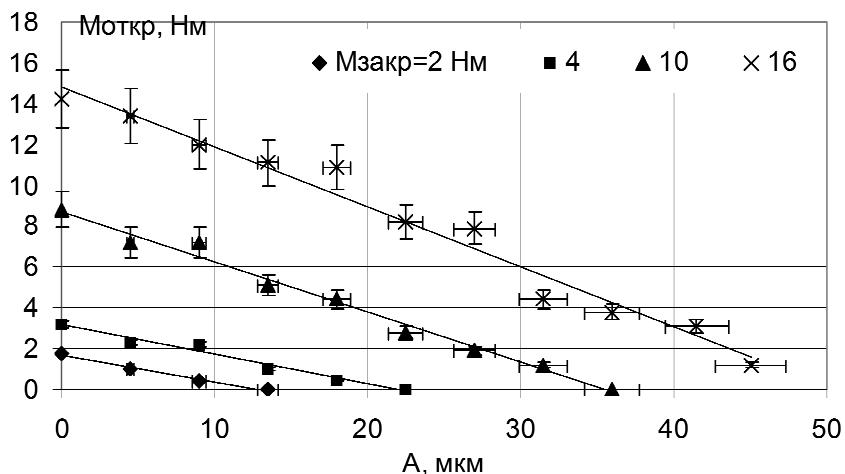


Рис. 3. Зависимости момента откручивания от амплитуды продольных колебаний при различных моментах закручивания

Самооткручивание при небольших амплитудах ультразвуковых колебаний наблюдается только при очень малых значениях момента закручивания (рис. 4). При высоких амплитудах (более 30 мкм) самооткручивание наблюдалось даже при значительных моментах закручивания.

Отметим, что амплитуды ультразвуковых колебаний, при которых происходит самооткручивание резьбового соединения, прямо пропорциональны усилию закручивания, что также соответствует полученным ранее аналитическим соотношениям.

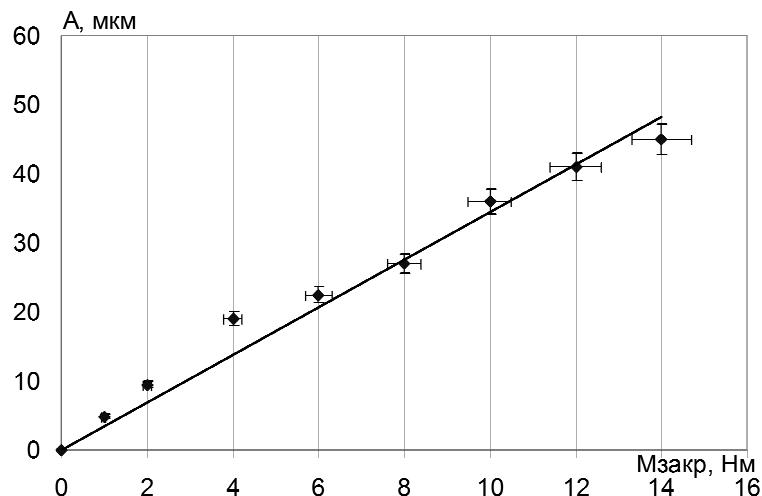


Рис. 4. Зависимость амплитуды ультразвуковых колебаний, при которой происходит самооткручивание резьбового соединения, от усилия его закручивания

Разрушений резьбового соединения нами не наблюдалось, однако эта опасность должна учитываться при выборе режима обработки.

Эффект применения ультразвука при разборке резьбовых соединений возрастает с ростом амплитуды вплоть до самооткручивания.

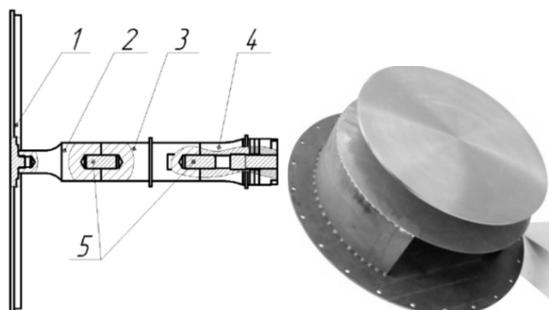
Самооткручивание неоднократно наблюдалось ультразвуковиками при опробовании работоспособности мощных ультразвуковых устройств в случае недостаточного момента закручивания резьбового соединения. По этой же причине для сборки элементов мощных ультразвуковых колебательных систем рекомендуются резьбы с небольшим шагом.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ

Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Доровских Р.С., Нестеров В.А., Голых Р.Н.

Бийский технологический институт, г. Бийск  
nva@btu.secna.ru

В настоящее время для улавливания частиц высокодисперсной (1-10 мкм) фазы из промышленных выбросов разработаны и применяются различные аппараты, отличающиеся друг от друга, как по конструкции, так и по способу осаждения взвешенных в газе частиц. Эффективность промышленных газоочистных установок, использующих сухой или мокрый способы улавливания, достигает 95-98%, что является недостаточной по современным экологическим требованиям. При этом увеличение эффективности используемых пылеуловителей за счет конструктивных модернизаций и изменения режимов движения газодисперсной и жидкой фаз не приносит желаемых результатов. Возможный путь повышения эффективности газоочистного оборудования – акустической коагуляции частиц за счет наложения высокоинтенсивных ультразвуковых полей [1]. Наиболее перспективным устройством для формирования акустических колебаний ультразвуковой частоты в газодисперсной среде является УЗ пьезоэлектрическая колебательная система с излучателем в виде диска ступенчато-переменного сечения [1-2]. На рисунке 1 показан эскиз и внешний вид ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) с дисковым излучателем [2].

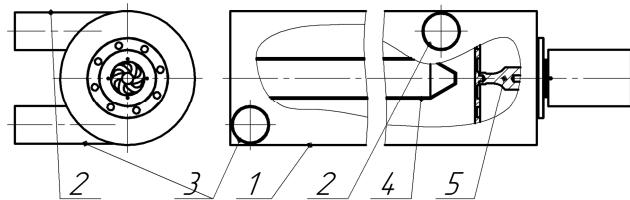


1 – дисковый излучатель;  
2 – концентратор;

3 – волновод; 4 – пьезоэлектрический преобразователь;

5 – шпильки

Рис. 1. Конструкция дискового излучателя



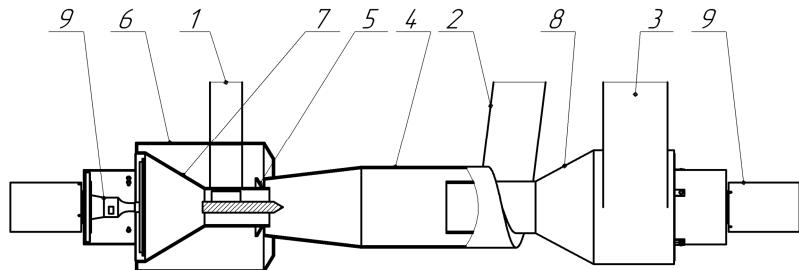
1 – коагуляционно-сепарационная камера;  
2 – входной патрубок (закручиватель);  
3 – выходной патрубок (раскручиватель);  
4 – обтекатель (вытеснитель);  
5 – дисковый излучатель;

Рис. 2. Эскиз коагуляционной камеры (агломератора) с УЗ дисковым излучателем

Для реализации УЗ коагуляция высокодисперсных частиц с целью увеличения эффективности газоочистного оборудования, основанного на сухом способе очистки был разработан двухступенчатый комплекс газоочистительного оборудования. Основное назначение первой ступени – обеспечение эффективной коагуляции частиц за счет их пребывания в УЗ поле, а также частичное разделение пылегазовой смеси [3]. Вторая ступень очистки при этом обеспечивает высокоэффективное улавливание агломератов частиц, поступающих с газовым потоком из первой ступени.

Первая ступень – коагуляционная камера выполнена в виде трубы с тангенциальными входным и выходным патрубками дополненной двумя УЗ дисковыми излучателями, работающими на частоте 20–24 кГц (рисунок 2). Такая конструкция позволяет производить центробежное разделение газодисперсного потока с одновременным осуществлением УЗ коагуляции. Принцип работы первой ступени заключается в следующем. Газовый поток, содержащий дисперсные частицы, поступает в камеру агломератора (1) через закручиватель входной потока (2), где в результате движения по спиральной траектории, под действием центробежных сил происходит его разделение на концентрированный периферийный слой и внутренний слой потока с меньшей концентрацией частиц. Внутри камеры частицы попадают

под действие акустического поля, сформированного установленным с торца УЗ излучателем (5). Воздействие акустическим полем приводит к коагуляции дисперсных частиц и, как следствие, дальнейшему разделению потока. В качестве второй ступени очистки может использоваться инерционное газоочистное оборудование, (например противоточные циклоны, аппараты со встречно-закрученными потоками (ВЗП)). При разработке газоочистного комплекса за основу второй ступени очистки был взят серийно выпускаемый пылеуловитель ВЗП-М. Выбор аппарата обусловлен его самой высокой эффективностью улавливания высокодисперсных частиц среди сухих пылеуловителей. Для повышения эффективности работы аппарата ВЗП путем совместного воздействия УЗ колебаниями и центробежными силами серийная конструкция аппарата ВЗП-М была доработана путем установки УЗ дисковых излучателей для окончательной коагуляции дисперсных частиц (рисунок 3).

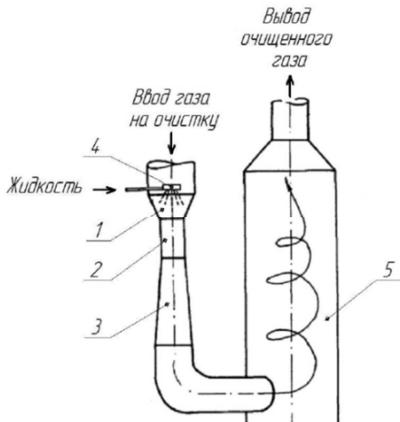


1 – патрубок первичного потока; 2 – патрубок вторичного потока; 3 – выходной патрубок;  
4 – сепарационная камера; 5 – отбойная шайба; 6 – бункер; 7,8 –усеченные конусы;  
9 – ультразвуковые излучатели

Рис. 3. Эскиз пылеуловителя со встречными закрученными потоками

Вторая ступень очистки работает следующим образом. Пылегазовый поток входит через патрубок закручивателя вторичного потока 2 (рисунок 3) и движется вниз в камере сепарации 4. Через патрубок закручивателя первичного потока 1 подается запыленный газ, встречаясь в камере сепарации и взаимодействуя с ним, формируется общий поток, который выходит через раскручиватель 3. Воздействие УЗ колебаний приводит к коагуляции частиц и дополнительному повышению эффективности газоочистки.

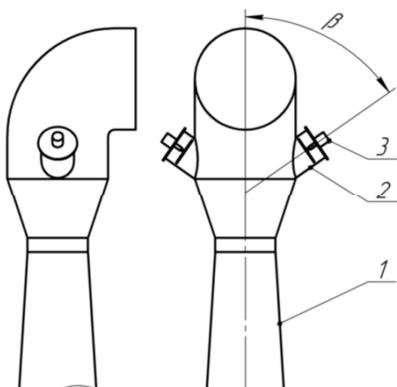
Предложенный способ улавливания очень эффективен для частиц с высокой адгезионной способностью согласно зависимостям, представленным на рисунке 6 (эффективность более 97%). Однако на практике возникает необходимость улавливания частиц, которые обладают меньшей слипаемостью, и агломераты этих частиц будут разрушаться при высоких скоростях потока воздуха вследствие чего повышение эффективности улавливания от предварительной коагуляции частиц будет сводиться к нулю. Поэтому необходимо вводить вспомогательное связующее вещество в виде крупных капель (100...200 мкм) воды. Однако на сегодняшний день широко применяются мокрые газоочистные установки с орошением водной дисперсией, такие как скруббера Вентури (рисунок 4). Для повышения эффективности этих установок предложено использовать акустическую коагуляцию в УЗ поле высокой интенсивности (более 140 дБ), не вносящее изменения в режимы работы газоочистного оборудования и интенсифицирующее осаждение улавливаемых частиц на капли воды. Одним из вариантов повышения эффективности коагуляции частиц в мокрых аппаратах с трубами Вентури является установка акустического излучателя таким образом, чтобы воздействие высокоинтенсивными УЗ колебаниями происходило главным образом в зоне осаждения частиц золы на капли жидкости. Схема установки УЗ-излучателей в трубу Вентури приведена на рисунке 5. Проведенные промышленные испытания представленного способа мокрого золоулавливания в трубе Вентури показали, что УЗ-коагуляция является эффективным методом повышения эффективности улавливания высокодисперсных частиц (менее 5 мкм).



1 – конфузор; 2 – горловина;  
3 – диффузор; 4 – форсунка;

5 – циклон-каплеуловитель

Рис. 4. Схема скруббера Вентури

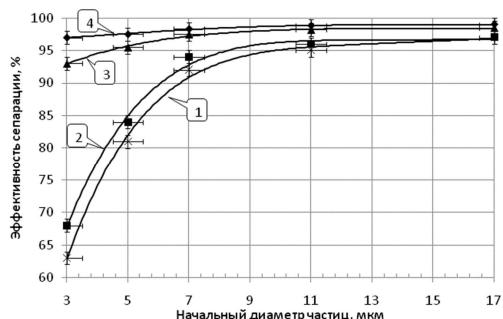


1 – труба Вентури; 2 – отвод для установки УЗ-излучателя;

3 – УЗ-дисковый излучатель;

Рис. 5. Схема установки 2-х УЗ-излучателей в трубу Вентури

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные о фракционной эффективности разработанного газоочистного оборудования (рис. 6 и 7).



1 – ВЗП; 2 – агломератор (без УЗ) и ВЗП (без УЗ); 3 – агломератор (+УЗ) и ВЗП (без УЗ); 4 – агломератор (+УЗ) и ВЗП (+УЗ)

Рис. 6. Фракционная эффективность двухступенчатого газоочистного комплекса

Анализ полученных результатов показал, что наличие УЗ-воздействия повышает эффективность улавливания высокодисперсных частиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ № СП-4173.2016.1.

#### Литература

- Хмелёв, В.Н. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, К.В. Шалунова // Химическая техника. – 2010. – № 1. – С. 23–28.
- Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
- Хмелев, В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вестн. высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2 (20). – С. 48–52.

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ С ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ НАЛОЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОЛОСУ В ИЗГИБНО-РАСТЯЖНОМ ОКАЛИНОЛОМАТЕЛЕ

Огарков Н.Н., Платов С.И., Суфьянов Д.В., Некит В.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова», Магнитогорск  
ogarkovnikolai@mail.ru

Удаление окалины с поверхности горячекатаной полосы перед ее холодной прокаткой осуществляется на непрерывно-травильных агрегатах (НТА) разбавленным раствором кислоты. Интенсивность ее растворения при прохождении через травильные ванны в значительной степени определяется доступностью реактивной среды к ней, особенно при наличии вкатанной окалины [1,2].

Известно, что разрыхленный слой окалины растворяется значительно быстрее, чем сплошной слой. Для разрыхления слоя окалины на поверхности горячекатаной полосы НТА включают изгибно-растяжные окалиноломатели, в которых полоса огибает ролики, благодаря чему она подвергается изгибу в различных направлениях. При этом часть окалины отслаивается, а в оставшейся окалине образуется большое количество очень тонких близкорасположенных поперечных трещин, что ускоряет действие кислоты.

Механическое воздействие на полосу с окалиной не всегда приводит к целенаправленному изменению состояния поверхности горячекатаной полосы перед ее травлением [3,4]. Повышение эффективности разрыхления и удаления окалины с ее поверхности в таких случаях целесообразно применять дополнительное энергетическое воздействие на поверхность контакта окалины с полосой. Одним из таких способов воздействия является наложение ультразвуковых колебаний на изгибающую роликами горячекатаную полосу [5,6,7].

С целью исследования влияния ультразвуковых колебаний горячекатаной полосы на эффективность разрыхления и удаления окалины с ее поверхности в лаборатории ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» была спроектирована и изготовлена в масштабе 1:6 геометрически подобная модель изгибно-растяжного окалиноломателя НТА-1 ЛПЦ-4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» [8].

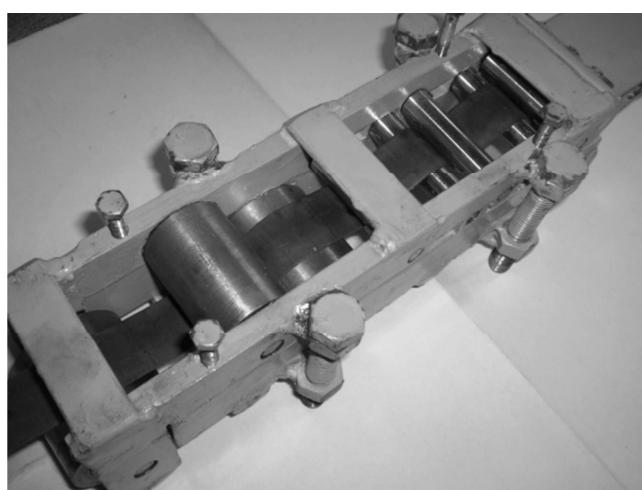


Рис. 1. Фото модели установки с заправленной полосой

Наложение ультразвуковых колебаний на протягиваемую горячекатаную полосу с окалиной реализовывалось с использованием ультразвукового генератора УЗГ-2-10, ультразвукового преобразователя и усилителя колебаний.

Лабораторная установка обеспечивала:

- а) изменение расстояния от линии протягивания полосы до оси роликов;
- б) встраивание в конструкцию дополнительного ролика;
- в) регулирование скорости и усилия натяжения полосы при прохождении ее через изгибающие ролики;
- г) наложение ультразвуковых колебаний на полосу с окалиной.

В качестве образцов использовались стальные полосы с окалиной на их поверхностях размером 25x480x0,6 и 25x480x0,8 мм, моделирующие горячекатаную полосу. Для определения площади удаленной окалины с поверхности образцов на их поверхностях размечали базовый участок протяженностью 200 мм. После каждого эксперимента, базовые участки были сфотографированы и переведены в цифровой формат. Подсчет удаленной окалины производили с использованием пакета программы PhotoShop 6.0. Каждый эксперимент повторяли не менее 3-х раз с усреднением результатов. Эксперименты проводили в два этапа – на модели изгибно-растяжного окалиноломателя НТА-1 ЛПЦ-4 ОАО «ММК» и на модели с встроенным в его конструкцию дополнительным роликом.

Результаты экспериментов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты экспериментов первого этапа

Характер воздействия на полосу	Толщина полосы, мм	Смещение роликов от уровня протягиваемой полосы, мм	Усиление протягивания, Н	Площадь удаленной окалины, мм <sup>2</sup>			Среднее значение	
				Номера опытов				
				1	2	3		
Механический	0,6	4	2400	1136,0	1540,5	1460,5	1453,6	
	0,6	6	2800	1410,7	1344,8	1678,7	1478,7	
	0,6	8	3600	1524,7	1600,2	1680,6	1601,8	
	0,8	4	3000	1392	1452,5	1530	1458,1	
	0,8	6	3200	1430,1	1400,5	1650,6	1493,7	
	0,8	8	3400	1641	1579,7	1701,7	1640,8	
Механический с наложением ультразвука	0,6	4	2250	1440,2	1664,5	1580,6	1561,7	
	0,6	6		1546	1382,6	1901,1	1609,9	
	0,6	8	3550	1812,4	1698,5	1744	1751,6	
	0,8	4	2800	1610	1600	1412,5	1540,8	
	0,8	6	3150	1508,1	1785,6	1451,6	1681,7	
	0,8	8	3380	1842	1735,1	1670,3	1749,1	

Анализ полученных данных показывает, что количество удаленной окалины с поверхности образцов увеличивается с ростом величины смещения роликов от линии протягивания полосы и при наложении на них ультразвуковых колебаний, однако с увеличением толщины образцов протягиваемых через изгибно-растяжной окалиноломатель, эффективность наложения ультразвуковых колебаний снижается. Увеличение площади удаляемой окалины с полосы толщиной 0,6 мм при наложении на нее ультразвуковых колебаний составляет 7,5...9,3 %, а для полосы толщиной 0,8 мм 5,6... 6,6 %. Меньшая эффективность удаления окалины с толстых полос связана с уменьшением амплитуды колебаний, накладываемых на полосу, при увеличении статической нагрузки на усилитель колебания.

На втором этапе исследования выполнены на модели изгибно-растяжного окалиноломателя со встроенным в его конструкцию дополнительного ролика меньшего диаметра, для обеспечения большего угла огибания ролика полосой. Результаты исследований по удалению окалины с полосы толщиной 0,8 мм сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты экспериментов второго этапа

Характер воздействия на полосу	Смещение роликов от уровня протягиваемой полосы, мм	Усиление протягивания, Н	Площадь удаленной окалины, мм <sup>2</sup>			Среднее значение	
			Номера опытов				
			1	2	3		
Механический	4	4800	1732,1	1711,4	1692,3	1711,9	
		6100	1790,1	1680,9	1804,4	1758,4	
		6550	1920,4	1740,2	1890,0	1850,2	
Механический с наложением ультразвука	4	4500	1804,2	1840,7	1720,9	1788,6	
		6050	1880,0	1806,7	1854,8	1847,1	
		6300	1960,0	1912,2	1852,6	1908,2	

Применение дополнительного ролика встроенного в конструкцию изгибно-растяжного окалиноломателя увеличивает площадь удаляемой с образцов окалины по сравнению с площадью удаляемой окалины на изгибно-растяжном окалиноломателе без дополнительного ролика и воздействия на полосу ультразвуком на 12,7...17,7%.

Эффективность применения ультразвука для удаления окалины с полосы при протягивании ее через изгибно-растяжной окалиноломатель с дополнительным роликом проявляется менее заметно и составляет 3,1...5,0 %, поскольку введение дополнительного ролика увеличивает натяжение протягиваемой полосы и, как следствие, увеличивает статическую нагрузку на усилители колебаний [7].

Резюмируя вышеизложенное делаем вывод, что применение ультразвуковых колебаний для интенсификации удаления окалины с горячекатаных полос, пропускаемых через изгибно-растяжные окалиноломатели, эффективны для окалиноломателей традиционных конструкций и малоэффективны для конструкций с дополнительными роликами встраиваемых в них.

### Литература

- Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. Исследование механизма образования дефекта «вкатаная окалина» / Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ. 2008. С. 106-110.
- Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. Экспериментальное исследование процесса образования дефекта «вкатаная окалина» с учетом взаимодействия металла с валком // Производство проката, №3. 2009. С. 2-4.
- Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В., Мурзаева Е.А., Курбан В.В. Теоретическое исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжной окалиноломатель непрерывно-травильного агрегата // Производство проката, №10. 2012.
- Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. Исследование процесса удаления окалины с полосы при прохождении ее через изгибно-растяжной окалиноломатель / Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-ой межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2010. С. 282-285.
- Никифоров Б.А., Королев Н.А., Платов С.И. Процесс ультразвуковой ковки. – В сб. «Теория и практика производства метизов». Свердловск: изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1980. С. 66-75.
- Ультразвуковая технология / под ред. В.А Аграната. М., 1974.
- Никифоров Б.А., Куприн М.И., Королев Н.А., Бахматов Ю.Ф., Сусанин Э.В. Влияние статической нагрузки на амплитуду колебаний инструмента при ультразвуковой обработке. – В сб. «Теория и практика производства метизов». Свердловск: изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1980. С. 76-78.
- Огарков Н.Н., Суфьянов Д.В. Правильно-растяжной окалиноломатель. Пат. U1, МПК G01B 3/48. Заявка 14.12.2009, опубл. 20.08.2010. Бюл. №23.

# ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ МЕДНОЙ МИКРОПРОВОЛОКИ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ

Петухов И.Б.<sup>1</sup>, Ланин В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Планар-СО», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь  
petuchov@kbtem.by

В настоящее время до 75% изготавливаемых микросхем в мире используют золотую проволоку для обеспечения надежных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой, а также между кристаллами и пассивными элементами сложных конструкций типа «система в корпусе». Чаще используется метод термозвуковой сварки «шарик-клип», при этом присоединение проволоки к контактной площадке кристалла производится оплавленным кончиком проволоки в шарик (рис. 1). Термозвуковая сварка представляет собой ультразвуковую сварку с дополнительным нагревом рабочей зоны до 220-240 °C и практически вытеснила из производства электронных изделий термокомпрессионную сварку с температурой рабочей зоны от 300 до 320 °C.

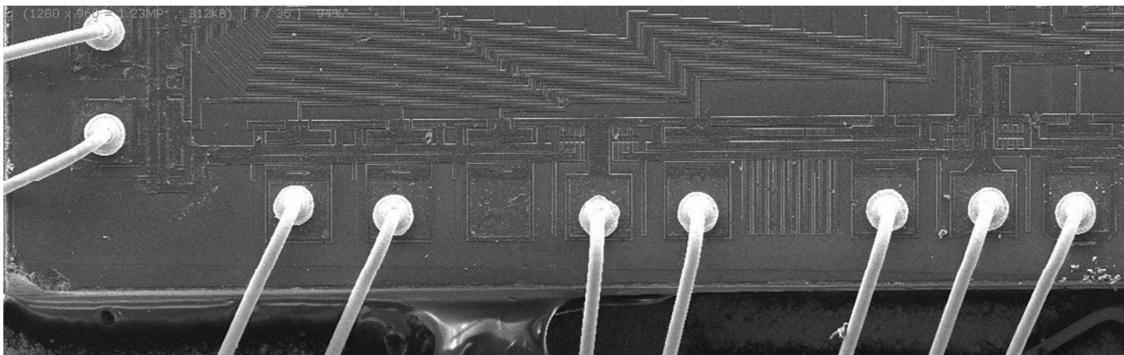


Рис. 1. Проволочные соединения золотой проволокой методом «шарик-клип»

В производстве микроэлектронных приборов главной движущей силой является снижение стоимости изделий. В приборах силовой электроники, где больший диаметр проволоки необходим для обеспечения токовой нагрузки, стоимость золотой проволоки составляет значительную долю стоимости изделий. Растущий интерес к использованию медной проволоки как альтернативы золотой проволоке объясняется, прежде всего меньшей стоимостью, которая приблизительно в 2 раза ниже стоимости золотой проволоки. Это позволяет снизить стоимость приборов и повысить их конкурентоспособность.

Теплопроводность у меди в 1,6 раз выше, чем у алюминия, и в 1,3 раза выше, чем у золота. Лучшая теплопроводность медной проволоки может обеспечить дополнительный теплоотвод от кристалла прибора при большом числе выводов. Меньшее электрическое сопротивление позволяет использовать медную проволоку диаметром в 1,25 раза меньше по отношению к диаметру золотой проволоки при одной и той же плотности тока. Это преимущество актуально для транзисторов средней мощности в малогабаритных корпусах для поверхностного монтажа.

Для микросварного соединения медной проволоки с алюминием характерен медленный рост интерметаллидов (примерно в 5 раз по сравнению с соединением Au-Al) [1], что гарантирует большую устойчивость прочности соединения при повышенных температурах в течение длительного периода.

Несмотря на очевидные преимущества, общеизвестны два основных недостатка, сдерживающих широкое применение медной проволоки. Во-первых, это быстрая окисляемость

проводки, особенно при повышенных температурах. Медь на воздухе покрывается оксидной пленкой, которая существенно влияет на качество сборочных операций при микросварке внутренних соединений между кристаллом и корпусом. Для предотвращения окисления и получения шариков сферической формы на конце медной проволоки используется инертный газ (смесь 95% азота и 5% водорода) при сборке методом «шарик-клип». Для обеспечения оплавления кончика медной проволоки разработана оригинальная конструкция разрядника, обеспечивающая с одной стороны, искровый разряд при подаче высоковольтного импульса, а с другой – подачу в зону искрообразования защитного газа. Во-вторых, это повышенная твердость медной проволоки, что требует тщательного подбора режимов сварки, исключающих кратерообразование на контактных площадках.

Для достижения качественной сварки медной проволокой используется, как правило, более высокая нагрузка на сварочный инструмент и увеличенная УЗ энергия. Это приводит, во-первых к повышенному механическому воздействию на контактную площадку кристалла, и во-вторых к сокращению срока службы инструмента в результате интенсивного износа. В исследовании использовались два типа медной проволоки диаметром 30 мкм производства ф.Tanaka [2] : CFB-1 и CLR-1A. Второй тип проволоки CLR-1A имеет тонкое (несколько десятков нанометров) покрытие палладием для защиты от атмосферного окисления и увеличения срока использования (до 6 месяцев).

Режимы оплавления медной проволоки потребовали увеличения энергии искрового разряда по сравнению с золотой проволокой такого же диаметра. Если для образования стандартного шарика (Ø60 мкм) на золотой проволоке диаметром 30 мкм ток разряда составляет 25 мА с временем разряда 1,2 мС (при отрицательной полярности высоковольтного напряжения на разряднике по отношению к проволоке), то для медной проволоки такого же диаметра потребовалось установить ток разряда 55 мА и время разряда 2,8 мС. Расход защитного газа составлял 0,6 л/мин. При более высоком расходе наблюдается ассиметричное положение шариков относительно оси проволоки и заметное влияние на искрообразование. При меньшем расходе пропадает видимый блеск на поверхности шариков и появление шероховатости. Внешний вид оплавленных шариков на кончике медной проволоки при оптимизированном процессе представлен на рис. 2.

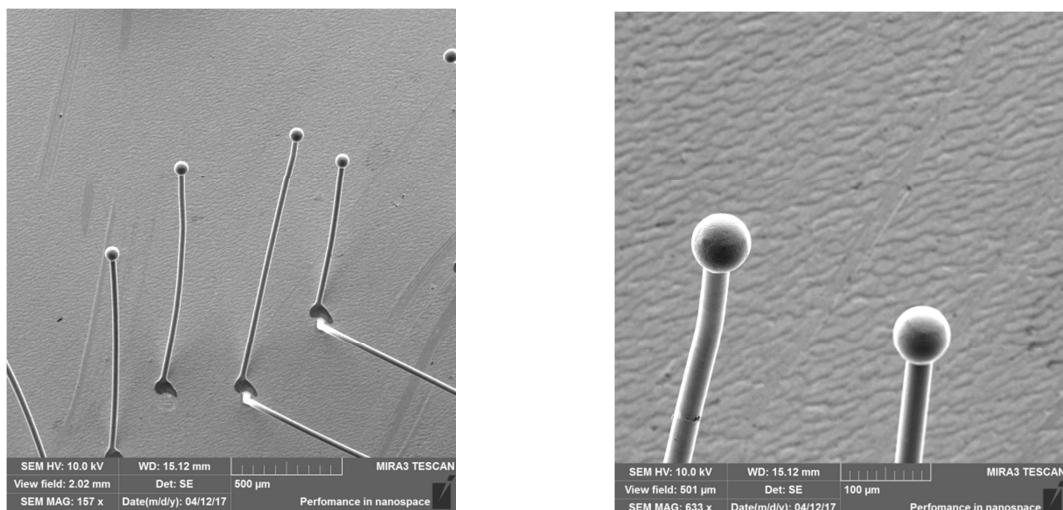


Рис. 2. Оплавленные шарики на кончике медной проволоки

Присоединение медной проволоки двух типов проводилось на установке присоединения медной проволоки ЭМ-4461 с использованием ультразвуковой системы стандартной частоты 64 кГц и ультразвуковой системы повышенной частоты 110 кГц. Ввиду повышенной микротвердости медной проволоки для достижения необходимой прочности сварных соединений ультразвуковая мощность, подводимая к ультразвуковому преобразователю, была увеличена в 1,4-1,5 раза по сравнению с процессом присоединения золотой проволоки такого же диаметра (30 мкм). При этом деформация шарика при приемлемой прочности и отсутствия «отлипов» от поверхности присоединения на стандартной 64 кГц частоте была завышенной (рис.3а).

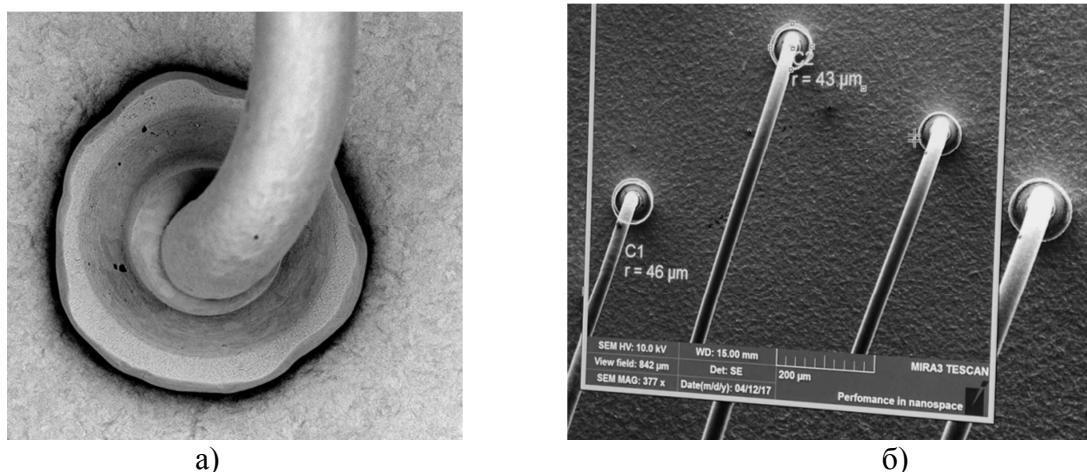


Рис. 3. Вид соединений шариком встык при использовании ультразвуковой частоты 64 кГц а) и ультразвуковой частоты 110 кГц б).

При использовании ультразвуковой системы повышенной частоты 110 кГц форма сварных соединений практически сравнима с формой присоединения золотой проволокой. При сравнении двух типов проволоки заметна более стабильная вторая сварка клином для проволоки типа CLR-1A с палладиевым покрытием (рис.4). Отмечена также прямолинейность сформированных проволочных перемычек из медной проволоки из-за ее большей упругости.

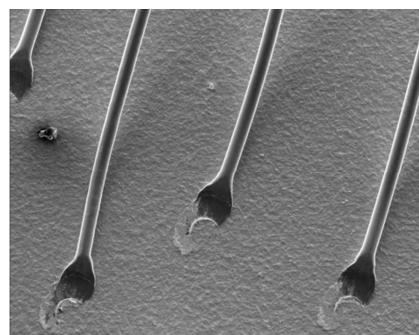


Рис. 4. Вид соединений шариком встык при использовании ультразвуковой частоты 110 кГц

#### Литература

1. C.C. Lee, T.A. Tran, V. Mathew, R. Ibrahim, P.L. Eu Copper ball voids for Pd-Cu wires: affecting factors and methods of controlling/IEEE 66<sup>th</sup> Electronic components and technology components conference,2016, p. 606-612.
2. [http://pro.tanaka.co.jp/en/products/Bonding\\_Wires.html](http://pro.tanaka.co.jp/en/products/Bonding_Wires.html)

# ПРОЦЕСС УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОВКИ

Платов С.И., Огарков Н.Н., Ярославцев А.В., Некит В.А.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск  
psipsi@mail.ru

Процесс ультразвуковой ковки проволоки в ленту осуществляется в очаге деформации (рис. 1), образованном двумя бойками, один из которых соединен с источником ультразвуковых колебаний (УЗК) – активный боек, другой – пассивный боек – является отражением УЗК.

Проволока 1 диаметром  $2r$  подвергается ковке между цилиндрическим активным бойком 2 диаметром  $2R$  и пассивным плоским бойком 3. Под действием силы  $F$ , прикладываемой к выходящей из бойков ленте 4, происходит ее перемещение на расстояние  $\Delta$  между проволокой и поднявшимися на величину двойной амплитуды  $2A$  колебаний активным бойком. Сила противонатяжения  $Q$ , приложенная к входящей в очаг деформации проволоке, осуществляет необходимую поперечную стабилизацию ленты и может быть использована для управления процессом уширения.

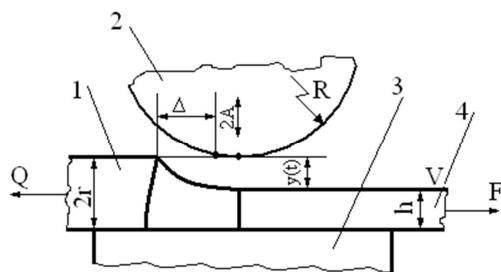


Рис. 1. Схема деформирующего узла

Рассмотрим кинематику процесса ультразвуковой ковки (рис. 2). По оси абсцисс дана временная развертка колебаний активного бойка. В нулевой момент времени начинается отрыв его от металла и подъем. Проволока входит в образовавшийся зазор между бойками и через промежуток времени, равный времени встречи  $t_s$ , происходит встреча бойков и проволоки. Далее осуществляется осадка металла на величину  $\delta \leq 2A$ . Боек оказывает на металл импульсное воздействие, параметры которого определяются текущими значениями скорости перемещения ленты и амплитуды колебаний бойка. Заменим дугу окружности бойка в зоне контакта хордой, наклонной к оси абсцисс под углом  $\alpha$  (рис. 3). В связи с тем, что в реальных конструкциях диаметр активного бойка во много раз больше диаметра обрабатываемой проволоки, ошибка от такой замены будет небольшой.

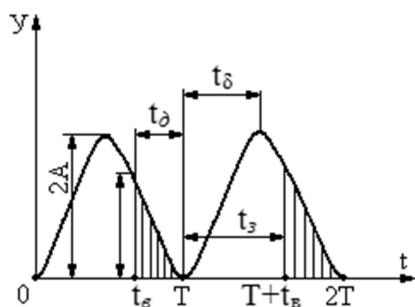


Рис. 2. Кинематика процесса ковки:

$t_s$  – время встречи бойков с проволокой;  $t_d$  – время деформирования;  
 $t_b$  – время подъема бойка;  $t_s$  – время существования зазора

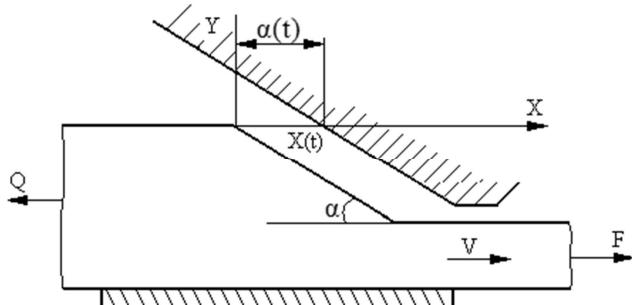


Рис. 3. К расчету кинематических параметров

Уравнение образующей контактной поверхности

$$y_k = -xtg\alpha = -kx,$$

где  $\alpha = arctg \sqrt{\frac{r_e}{R}}$ .

Колебания бойка в выбранной системе координат описываются уравнением

$$y = -Kx + A(1 - \cos\omega t), \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота;

$f$  - частота УЗК;

$A$  - амплитуда колебаний активного бойка.

Для упрощения анализа примем, что пассивный боек представляет собой полу бесконечный отражатель, поэтому его вынужденными колебаниями пренебрегаем.

Осцилляцию зазора во времени определим из уравнения (1) при  $y=0$ :

$$x(t) = \frac{A}{K}(1 - \cos\omega t).$$

Путь, пройденный металлом до встречи с бойком, равен величине самой щели, следовательно

$$Vt_e = \frac{A}{K}(1 - \cos\omega t_e). \quad (2)$$

Очевидно, что при  $t_e=T/2$  ( $T$  – период УЗК) раскрытие щели будет небольшим. Для того, чтобы встреча произошла в момент максимального раскрытия, необходимо иметь наибольшую импульсную скорость перемещения проволоки в пределах щели:

$$V_{u_f} \frac{T}{2} = \frac{A}{K} \left(1 - \cos\omega \frac{T}{2}\right),$$

откуда

$$V_{u_f} = \frac{4}{K} \frac{A}{T}.$$

Учитывая в первом приближении, что вторую половину периода лента не транспортируется через очаг деформации – происходит собственно осадка ее между бойками - максимально возможная скорость намотки ленты на катушку

$$V_{max} = V_{u_f/2} = \frac{2A}{KT}.$$

Процесс ковки металла бойками начинается с момента встречи проволоки с ними и продолжается до конца периода колебаний бойка. Время встречи определяется из уравнения (2) итерационным методом, например, по следующей схеме:

$$t_{\epsilon n+1} = t_{\epsilon n} - \frac{Vt_{\epsilon n} + A/K(\cos t_{\epsilon n} - 1)}{4(V/2 + A\omega)}, \quad (3)$$

при условии, что

$$\left| \frac{t_{\epsilon n+1} - t_{\epsilon n}}{t_{\epsilon n}} \right| \leq 0,001.$$

Мощность пластического формоизменения в очаге деформации в процессе ковки определим по формуле Финка

$$N_\phi = \frac{\sigma_n W}{T - t_\epsilon},$$

где  $\sigma_n = P/S_K$  – среднее контактное давление;

$W = S_K \delta$  – смещенный объем в акте элементарной ковки;

$\delta$  – путь элементарной ковки, определяемый решением (1) при  $x=0$  и  $t=t_b$ ;

$T - t_\epsilon$  – время элементарной ковки.

Для расчета силы, необходимой для протягивания проволоки через бойки, примем, что при больших скоростях протягивания напряжения в ленте достигают напряжения волочения проволоки через клиновую матрицу, образованную бойками. Напряжение волочения проволоки через коническую матрицу определим по формуле Закса

$$\sigma_F = 0,57\Psi\sigma_\phi \left( 1 + \frac{tg\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{S_L}{\pi r^2} \right)^{\mu ctg\alpha} \right],$$

где  $\Psi$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий долю времени протяжки от времени ковки. В первом приближении  $\Psi=0,5$ .

Таким образом, предложены зависимости для определения основных параметров процесса ультразвуковой ковки, необходимые для разработки технологии процесса и выбора оборудования.

# О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТАЛЛА ПО АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ УПРУГИХ ВОЛН

Иляхинский А.В., Родюшкин В.М.

Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород  
ilyahinsky-aleks@bk.ru

Современные тенденции в исследованиях в значительной степени определяются практическими потребностями. Несовершенства в структуре металла во многом обуславливают его нелинейные свойства. В связи с этим представляется перспективным опираясь на достижения нелинейной акустики рассмотреть возможность создания «индикатора поврежденности» для оценки технического состояния металла до его разрушения (до появления дефектов: несплошностей, трещин и т.д.).

Цель работы - показать возможность и достоверность метода нелинейной диагностики при акустическом зондировании дефектной структуры металла на стадии микротекучести до образования макродефектов и зарождения трещин.

В качестве объекта исследования были выбраны пропорциональные плоские образцы тип I №21 ГОСТ 1497 - 84 толщиной 4мм, изготовленные из стали марки Ст10 с целью снятия внутренних напряжений и получения равновесной дефектной структуры исходные заготовки образцов были подвергнуты отжигу в вакууме при температуре 860 градусов Цельсия. Механические свойства материала отожженных образцов, определенные в результате механических испытаний на растяжение, составили: предел прочности  $\sigma_b = 412$  МПа; условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 290$  МПа и относительное удлинение  $\delta = 28\%$ .

Образцы были подвергнуты 50 циклам знакопостоянного отнулевого нагружения при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин с амплитудой напряжения в цикле  $0,6\sigma_{0,2}$ ;  $0,7\sigma_{0,2}$  и  $0,8\sigma_{0,2}$ . Циклические испытания и испытания на растяжение проводились на универсальной испытательной машине фирмы Tinius Olsen Ltd, модель H100KU обеспечивающей погрешность измерения нагрузки 0.5%. Деформация образца измерялась посредством экстензометра модели 3542 с базой 50 мм с разрешающей способностью системы измерения деформации 0,0001 мм. Зависимость напряжения от деформации для пятидесяти циклов нагружения при напряжениях в цикле  $0,6\sigma_{0,2}$ ;  $0,7\sigma_{0,2}$  и  $0,8\sigma_{0,2}$  представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Образец в захватах испытательной машины Tinius Olsen Ltd, модель H100KU при проведении циклических испытаний.

Зависимость коэффициента поглощения упругой энергии  $\Psi_i = \Delta U_i / U_i$ , где  $\Delta U$  - площадь петли гистерезиса пропорциональная доле поглощенной энергии,  $U$  - площадь под кривой деформации разгрузки пропорциональная энергии упругой деформации, от числа циклов нагружения для напряжений  $0,6\sigma_{0,2}$ ;  $0,7\sigma_{0,2}$  и  $0,8\sigma_{0,2}$  представлена на рисунке 2.

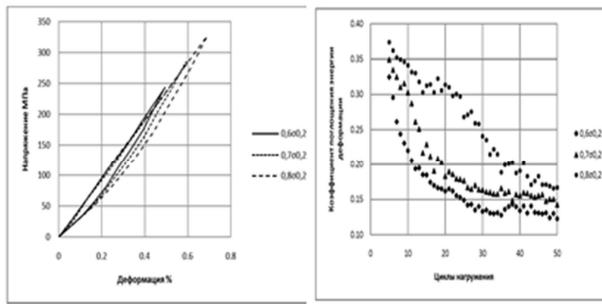


Рис. 2. Зависимость напряжения от деформации и для пятидесятих циклов нагружения и зависимость коэффициента поглощения упругой энергии от числа циклов нагружения для напряжений  $0,6^*\sigma_{0,2}$ ;  $0,7^*\sigma_{0,2}$  и  $0,8^*\sigma_{0,2}$ .

Техническое средство акустического контроля представляло собой специализированное устройство, позволяющее создавать как непрерывную поверхностную волну и аппаратуру для измерения и последующего анализа статистических и нелинейных параметров упругих волн, так и импульсную, как это делается в стандартной дефектоскопии. Излучающий и приемный ПЭП (пьезоэлектрические преобразователи фирмы «Алтес» – П121-1,0-90S и П121-2,0-90S на частоте колебания 1 и 2МГц) устанавливались на фиксированное расстояние друг от друга с помощью механического удерживающего устройства УКП2, изображенного на рисунке 3.



Рис. 3. Механическое удерживающее устройство с установленными ПЭП.

Импульсное возбуждение излучающего ПЭП осуществлялось с помощью дефетоскопа А1214, с приемного ПЭП сигнал для анализа временной диаграммы зондирующего импульса поступал на осциллограф Tektronix TDS2022 с разрешением по времени 2 нсек.

Идея использования акустической нелинейности, рис.4, для диагностических целей не нова [1,2]. В данной работе при зондировании металла непрерывной волной в качестве параметра, характеризующего акустическую нелинейность, использовано выраженное в дБ соотношение амплитуды основной гармоники на 1МГц и кратной второй гармонике - соответственно на 2 МГц, для чего разработан и изготовлен максимально простой компактный прибор для мониторинга металла, по существу специализированный вольтметр, обращение с которым не требует специальных радиофизических знаний.

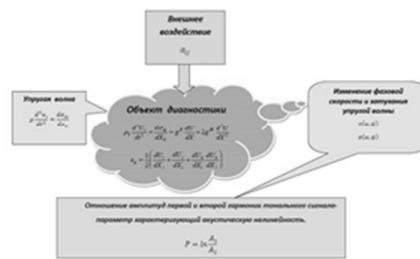


Рис. 4. Методология оценки поврежденности по акустической нелинейности.

Разработана и апробирована новаторская методика анализа информационной структуры зондирующего импульса, идея которой схематично представлена на рис.5. Нелинейность процесса распространения упругой волны оценена путем представления процессов

взаимодействия тональной упругой волны с материалом исследуемого объекта статистической моделью в виде распределения Дирихле [3].



Рис. 5. Оценка параметра самоорганизации формы зондирующего импульса.

Нормализованные значения акустической нелинейности для образцов подвергнутых 50 циклам знакопостоянного от нулевого нагружения при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин с амплитудой напряжения в цикле 0.6Б<sub>0.2</sub> (без выдержки при максимальной нагрузке) - №2; 0.6Б<sub>0.2</sub> (с пятиминутной выдержкой при максимальной нагрузке) – №3; 0.8Б<sub>0.2</sub> (без выдержки при максимальной нагрузке) - №6 и нагружению до образования «шейки» - №4, полученные как результат прямой оценки отношения амплитуд первой (1 МГц) и второй (2МГц) гармоник релеевской волны и результат анализа информационной структуры непрерывного тонального сигнала представлены на рис. 6

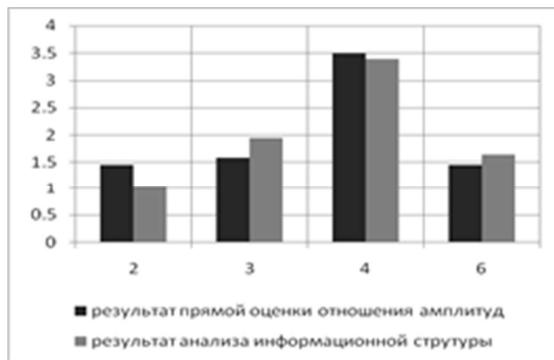


Рис. 6. Нормализованные значения акустической нелинейности

По своему характеру результаты оценки акустической нелинейности методом анализа информационной структуры зондирующего импульса, совпадает с прямой оценкой нелинейности сигнала по отношению амплитуд первой (1 МГц) и второй (2МГц) гармоник, что расширяет возможности ультразвукового зондирования для контроля процесса накопления структурных повреждений металла.

Полученные результаты демонстрируют, возможность использования нелинейных волн Рэлея характеризовать поврежденность металла, что может быть полезно для моделей прогнозирования ресурса. Предложена методика анализа информационной структуры зондирующего импульса и ультразвуковое устройство для измерения и последующего анализа непрерывной поверхностной волны для измерения показателя нелинейности в зондирующем сигнале, что переводит его в ранг средств неразрушающего контроля.

#### Литература

1. Мишакин В.В., Родюшкин В.М. Нелинейность как индикатор преддефектного состояния // Безопасность труда в промышленности. 2009. №7. С.48-53
2. Зайцев В. Ю., Назаров В. Е, Таланов В. И. «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН. 2006. №176:1. С.97–102.
3. Иляхинский, А.В., Родюшкин В.М. Распределение Дирихле в задаче оценки состояния металла методом акустического зондирования // Дефектоскопия. 2015. №7. С.13-17.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОМ НА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТУЮ СТРУКТУРУ НИКЕЛЯ

Самигуллина А.А.<sup>1</sup>, Мухаметгалина А.А.<sup>1</sup>, Жиляев А.П.<sup>1</sup>, Назаров А.А.<sup>1</sup>,  
Рубаник В.В.<sup>2</sup>, Царенко Ю.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

<sup>2</sup>Институт технической акустики НАН Беларусь, г. Витебск, Белоруссия  
asiya\_nazarova@mail.ru

## Введение

Воздействие знакопеременных упругих напряжений с ультразвуковой частотой на структуру и свойства различных материалов изучается достаточно давно. Известны области применения ультразвуковой обработки (УЗО) с целью упрочнения поверхности металлов [1], формирования в материале нанокристаллического поверхностного слоя [2], стимуляции различных фазовых превращений [3] и т.д. Воздействие УЗО в процессе пластической деформации приводит к значительному снижению напряжения течения; это явление получило название акустопластического эффекта [4]. УЗО применяется также в качестве релаксирующего воздействия на предварительно деформированный материал и приводит к снижению твердости и прочности [5].

Большой интерес представляет воздействие УЗО на структуру ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), так как основными элементами их структуры являются неравновесные границы зерен и высокая плотность дефектов, взаимодействие которых с ультразвуковой волной может привести к принципиально новым эффектам.

В работе изучается влияние амплитуды УЗО на структуру УМЗ никеля, полученного ИПД кручением, и описываются возможные механизмы воздействия УЗО на высокодефектную структуру.

## Материал и методика исследования

Исследовали технически чистый никель (99,5%) марки НП-2. Образцы в форме дисков были подвергнуты ИПД кручением под квазигидростатическим давлением (КГД) 6 ГПа на наковальнях Бриджмена при комнатной температуре. В результате были получены диски толщиной 0,35 мм и диаметром 11 мм, имеющие УМЗ структуру со средним размером зерен около 300 нм. УЗО осуществлялась по схеме, описанной в [6]. Осцилирующие напряжения сжатия-растяжения, возбуждаемые в образцах, имели амплитуды приблизительно 15, 30, 45, 60 и 90 МПа.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводили с использованием данных, полученных при съемке поверхности образцов на дифрактометре ДРОН-4. Образцы подвергали механической, а затем электролитической полировке. Съемку проводили с шагом по углу отражения  $0.05^\circ$  и временем экспозиции 4 с. Использовали излучение Cu K $\alpha$ -серии. Обработку данных осуществляли с использованием программы X-RAY. Микроструктура исследовалась методом ПЭМ на микроскопе JEM 2000EX. Фольги для электронномикроскопических исследований готовили на приборе для струйной полировки TenuPOL. EBSD-анализ проводился с помощью микроскопа TESCAN MIRA 3 LMH FEG с приставкой для EBSD-анализа «CHANNEL 5». Съемку осуществляли в пошаговом режиме с шагом 100 и 50 нм с площади соответственно 400 и 100 мкм<sup>2</sup>. Микротвердость по Виккерсу измеряли на установке Axiovert100A с приставкой МНТ-10 при нагрузке индентора 100г и времени выдержки 10 с. Дифференциально сканирующую калориметрию (ДСК) проводили на термическом анализаторе Netzsch STA449F3 Jupiter. Дискообразные образцы диаметром 4,8 мм были вырезаны из исходных деформированных и обработанных ультразвуком образцов, затем на

них было проведено до четырех последовательных ДСК-проходов в интервале температур от 30 до 700°C в атмосфере аргона. Скорость сканирования для всех образцов составляла 10К/мин.

### Результаты эксперимента

В таблице 1 представлены результаты PCA и EBSD анализа, а также значения микротвердости для образцов после КГД (УЗО с амплитудой 0 МПа) и после УЗО с различными амплитудами. Зависимость среднеквадратической деформации, средней плотности дислокаций и микротвердости от амплитуды УЗО имеет следующую закономерность: вначале с увеличением амплитуды все эти характеристики немного увеличиваются, затем их значения снижаются и достигают минимума при амплитуде 60 МПа. Далее, при амплитуде 90 МПа, снова наблюдается рост этих характеристик. При этом средние размеры зерен и фрагментов значительно не меняются. Доля малоугловых границ зерен (МУГ) также минимальна при амплитуде УЗО 60 МПа.

Таблица 1. Данные PCA и EBSD анализа, значения микротвердости образцов УМЗ никеля после КГД и КЗО с различными амплитудами

Амплитуда УЗО, МПа	PCA		EBSD-анализ			Нv, МПа
	Размеры ОКР, нм	Микродеформация $\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2} (\times 10^{-3})$	Средний размер зерен, мкм	Доля МУГ, %	Плотность дислокаций, ( $\text{м}^{-2}, \times 10^{14}$ )	
0	143.7	6.06	0.25	24	1.17	3296
15	148.6	6.43	0.26	22	1.19	3385
30	146.8	6.68	0.27	20	1.06	3383
45	152.2	5.90	0.26	19	1.00	3276
60	144.9	4.74	0.27	16	0.96	3199
90	144.6	6.22	0.25	19	1.02	3251

Графики выделения энергии, полученные по результатам ДСК, представлены на рис.1а. Для всех образцов наблюдается небольшой пик выделения энергии между 200 и 300°C, который может быть связан с процессом возврата, заключающимся в перестройке дислокаций и релаксации неравновесных границ зерен без существенного роста зерен. График зависимости значений выделившейся запасенной энергии, рассчитанных из этих пиков, от амплитуды УЗО, приведен на рис.1б. Он хорошо согласуется с поведением плотности дислокаций, микродеформации и микротвердости в зависимости от режима УЗО и показывает, что при амплитудах примерно до 40 МПа происходит рост накопленной энергии, что, вероятно, связано с накоплением дислокаций внутри зерен. Дальнейшее повышение амплитуды приводит к активизации процесса релаксации, проявляющейся в уменьшении запасенной энергии. Когда амплитуда УЗО проходит определенное значение (около 60 МПа), начинается интенсивное размножение дислокаций, которое приводит к повышению запасенной энергии.

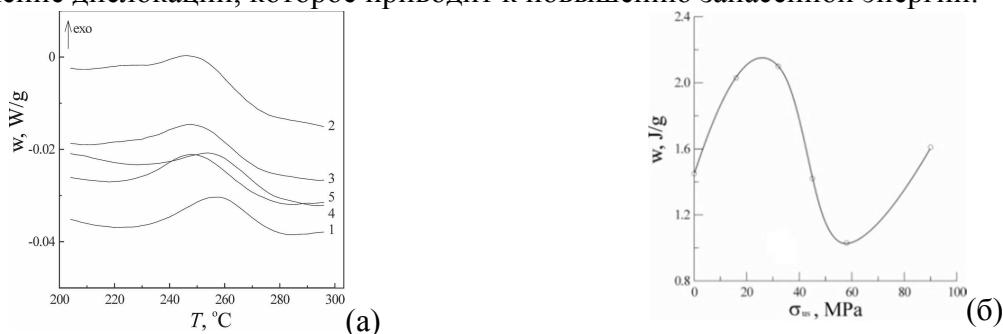


Рис. 1. (а) - Результаты ДСК: пики, связанные с процессами возврата в образцах никеля, подвергнутых КГД (1) и УЗО с амплитудами 15 (2), 30 (3), 45 (4), 60 (5) и 90 МПа (6); (б) - Зависимость значений запасенной энергии, выделившейся при проведении ДСК, от амплитуды УЗО

На рис. 2 представлены ПЭМ-изображения структур границ и внутренних объемов зерен УМЗ никеля после КГД и УЗО с амплитудами 15, 60 и 90 МПа. Эти амплитуды представляют

собой ключевые точки на графике зависимости запасенной энергии от амплитуды УЗО. В исходном деформированном состоянии внутри зерен наблюдаются сложные контуры экстинкции, характеризующие высокие поля внутренних напряжений (рис.2а). Границы зерен четко не определяются. УЗО с амплитудой 15 МПа приводят к генерации дислокаций внутри зерен, которые образуют скопления на границах (рис.2б) и не способны преодолеть эти барьеры при данном значении внешней силы. При повышении амплитуды внешнего напряжения дислокации встраиваются в границы зерен, проходят через них, подвергаются перестройкам в низкоэнергетические конфигурации, что способствует релаксации дальнодействующих напряжений. На ПЭМ-снимках в этом состоянии границы зерен четкие, ровные (рис.2в). Дальнейшее повышение амплитуды приводит к тому, что процессы генерации дислокаций начинают преобладать над процессами их перестройки и аннигиляции, и плотность дефектов снова увеличивается (рис.2г).

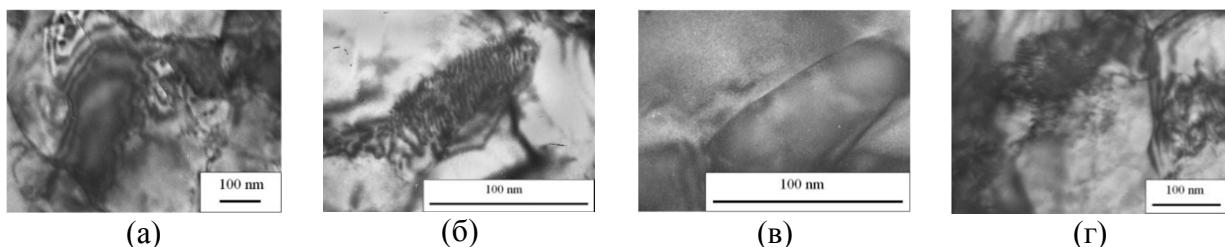


Рис. 2. ПЭМ-изображения дефектной структуры УМЗ никеля после КГД (а) и УЗО с амплитудами 15 (б), 60 (в) и 90 МПа (г)

### Выводы

Параметры структуры и свойства УМЗ никеля, полученного методом КГД, немонотонно зависят от амплитуды УЗО. Существует значение амплитуды, при которой все эти параметры достигают минимального значения. Эта амплитуда является оптимальной для релаксации структуры и различна для каждого материала и способа деформационной обработки.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

### Литература

1. Abramov O.V. High-Intensity Ultrasonics: Theory and Industrial Applications, CRC Press, Boca Raton, 1999.
2. Панин А.В., Мельникова Е.А., Перевалова О.Б. и др. Формирование нанокристаллической структуры в поверхностных слоях стали ЭК-181 в процессе ультразвуковой обработки // Физ. мезомех. 2009. Т.12. №2. С.83-93.
3. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Волочение и отжиг стальной проволоки с наложением ультразвуковых колебаний // Применение физических и физико-химических методов в технологических процессах. Научные труды МИСиС. М.: Металлургия. 1991. С. 98-102.
4. Degtyarev V.T. On possible mechanisms of the acoustoplastic effect // Doklady Phys. 2007. V.52. №5. P. 245-246
5. Мац Ф.В., Нетесов В.М., Соколенко В.И., Ковтун К.В. Релаксационные эффекты в деформированном гафнии при ультразвуковом воздействии // Вопросы атомной науки и техники. 2009. №4-2. С.167-169.
6. Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Сергеев С.Н., Жиляев А.П., Назаров А.А., Загидуллина Ю.Р., Пархимович Н.Ю., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость ультразмелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением // Письма о материалах. 2017. Т. 7. вып. 2. С. 85-90.

# УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Абраменко Д.С., Цыганок С.Н., Хмелев В.Н

ФГБОУ ВО «Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова»,  
Бийск  
grey@btu.secna.ru

Существует множество случаев, когда невозможно осуществлять воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями высокой интенсивности непосредственно на объект из-за отсутствия прямого доступа к нему. При этом возникает необходимость передавать УЗ колебания через стенки технологических камер и объемов, по трубопроводам, через крепежные элементы, через зоны, расположенные вблизи зон протекания процесса и т.п.

Наиболее яркие примеры технологий, исключающих непосредственное воздействие: прессование волокнистых, пористых и порошковых материалов; снижение трения при транспортировке сыпучих материалов; очистка поверхностей от загрязнений и отложений; снятие внутренних механических напряжений в сварных швах; опосредованное воздействие на технологические среды и исследуемые объекты (например, керны) и т.д. [1-4]. Во всех случаях интенсификация процессов требует активного воздействия УЗ колебаниям высокой интенсивности для возбуждения колебаний в разнообразных физических объектах.

ООО «Центр ультразвуковых технологий» совместно с Бийским технологическим институтом разрабатывает и выпускает аппараты для решения поставленных задач.

Для воздействия на формируемое изделие, например, при изготовлении топливных брикетов из волокнистых материалов с добавлением наполнителей используются устройства в виде конусной формующей насадки, колеблющейся на УЗ частоте. При формировании конечного изделия под действием УЗ колебаний достигается уменьшение силы трения поверхности брикета о внутреннюю поверхность пресс-формы, причем трение покоя заменяется на трение скольжения. Происходит «отжатие» поверхности формируемого брикета от стенок пресс-формы и транспортировка брикета без разрушения внутрь пресс-формы. При амплитуде колебаний до 10 мкм происходит уменьшение статической прессования силы в два раза. Периодические трехмерные смещения частиц материала и наполнителя приводят к равномерному уплотнению материала внутри брикета [5]. Для реализации процессов применяются аппараты, один из которых представлен на рисунке 1.



Технические характеристики

Напряжение сети переменного тока, В	220±10%
Частота механических колебаний, кГц	20±1,5
Максимальная потребляемая мощность, ВА	1000
Масса электронного блока, кг, не более	8
Масса колебательной системы, кг, не более	6
Время непрерывной работы, ч	8
Входной/выходной диаметр, мм	70/25
Размах амплитуды колебаний, мкм	10

Рис. 1. Ультразвуковой аппарат для интенсификации прессования сыпучих и волокнистых материалов

В ряде случаев необходимо реализовать воздействие на жидкые или сыпучие материалы внутри технологических объемов, трубопроводов, удалить отложения и загрязнения с внутренней поверхности теплообменяющих устройств, снизить силу трения при транспортировке сыпучих продуктов и т.д. Для этих таких целей применяются ультразвуковые аппараты, аналогичные приведенному на рисунке 2. УЗ колебательная система может присоединяться к объекту воздействия помочи шпильки или хомутов различной формы. Такой

вариант монтажа позволяет осуществлять УЗ воздействие по всему объекту, путем перемещения УЗ колебательной системы. Электронный блок при этом осуществляет автоматический поиск оптимальных частот УЗ воздействия.



#### Технические характеристики

Напряжение сети переменного тока, В	220±10%
Частота механических колебаний, кГц	от 16,5 до 19,5
Максимальная потребляемая мощность, ВА	1000
Масса электронного блока, кг, не более	8
Масса колебательной системы, кг, не более	4
Время непрерывной работы, ч	8
Диаметр хомута, мм	41
Размах амплитуды колебаний, мкм	20

Рис. 2. Ультразвуковой аппарат для возбуждения колебаний физических объектов

Не всегда возможно осуществлять воздействие на зону протекания процесса. Например, сложно реализовать процесс кристаллизации металла, воздействуя на расплав. Поэтому, на некотором расстоянии от горелки устанавливается излучатель, воздействующий контактно на расплав, обеспечивая при этом снятие остаточных напряжений. Для реализации подобных процессов может применяться аппарат, аналогичный приведенному на рисунке 3.



#### Технические характеристики

Напряжение сети переменного тока, В	220±10%
Частота механических колебаний, кГц	16±1,65
Максимальная потребляемая мощность, ВА	400
Масса электронного блока, кг, не более	8
Масса колебательной системы, кг, не более	3
Время непрерывной работы, ч	8
Рабочее окончание в виде полусферы сферы, радиус, мм	2,5
Размах амплитуды колебаний, мкм	50

Рис. 3. Ультразвуковой аппарат для снятия внутренних напряжений для сварных швов

Такое ультразвуковое оборудование применяется для сборки трубопроводов в составе орбитальных сварочных установок.

При формировании УЗ колебаний физических объектов, нагретых до высокой температуры (1000 °C), используется аппарат, показанный на рисунке 4. Его отличительной особенностью является наличие охлаждающего объема в конструкции колебательной системы. Он обеспечивает тепловую отсечку от пьезоэлементов.



#### Технические характеристики

Напряжение сети переменного тока, В	220±10%
Частота механических колебаний, кГц	18±1,35
Максимальная потребляемая мощность, ВА	1000
Масса электронного блока, кг, не более	8
Масса колебательной системы, кг, не более	12
Время непрерывной работы, ч	8
Температура обрабатываемой среды, тах., °C	1000
Размах амплитуды колебаний, мкм	10

Рис. 4. Ультразвуковой аппарат для возбуждения колебаний в экстремальных условиях

Наложение УЗ колебаний на распыляющую форсунку при получении порошка позволяет увеличивать выход мелкой фракции (до 10 мкм) до 35% [6].

Одна из проблем – УЗ воздействие на многотонные металлические конструкции (удаление льда на циклонах для газоочистки; предотвращение забивания глиной металлической сетки лотков для золотодобычи; очистка теплообменников и т.п.). Для решения проблемы создано УЗ оборудование мощностью до 8000 ВА. Эскиз УЗ колебательной системы такого оборудования приведен на рисунке 5.



Рис. 5. Эскиз УЗ колебательной системы для возбуждения колебаний физических объектов: 1 –рабочий инструмент, 2 – пьезоэлектрический преобразователь в корпусе, 3 – патрубки для жидкостного охлаждения

Потребность в оборудовании, обеспечивающем УЗ воздействие на физические объекты, постоянно возрастает. Предлагаемые аппараты могут помочь в решении проблем производств и позволяют формировать требования к созданию новых аппаратов.

#### Литература

- Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин. – Бийск, Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2007. – 400 с.
- Хмелев, В.Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции / Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Цыганок С.Н., Левин С.В. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 196 с.
- 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.
- Хмелев, В.Н. Ультразвуковые технологический аппараты – как эффективный инструмент создания новых технологий и материалов / Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелев М.В. – Витебск: Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы, Витебский государственный технологический университет, 2016. – С. 16-19.
- Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S., Lebedev A.N. Ultrasonic Device for Intensification of Extrusion Process of Fibrous Material // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.290-293.
- Хмелев В.Н., Змановский С.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Использование ультразвуковых колебаний для повышения эффективности распыления расплава алюминия // Научно–технический вестник Поволжья, 2011. – № 5. – С. 135-140.

# ИЗУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ ЖИДКОЙ ВОДОЙ

Шайтура Н.С., Ларичев М.Н.

Институт энергетических проблем Химической Физики РАН им. Тальрозе, Москва  
tesh-s@yandex.ru

## 1. Введение

Металлический алюминий является эффективным энергоаккумулирующим металлом с высокой химической активностью. Алюминий традиционно используется как энергетический добавок в различных пиротехнических составах, а также в топливах специального назначения. В настоящее время реакция окисления алюминия водой интенсивно исследуется как перспективный способ получения газообразного водорода для нужд водородной энергетики [1]. Практическое применение этого способа имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами, разрабатываемыми в настоящее время.

Наиболее простой и безопасной реализацией процесса окисления алюминия водой представляется его низкотемпературное окисление при температурах ниже температуры кипения воды. Обязательным условием для реализации практического использования данного процесса является обеспечение разумных скоростей окисления алюминия, позволяющих производить водород в количествах, определяемых его потреблением. На практике это означает необходимость окисления металла заданной дисперсности при одновременном использовании методов активации (ускорения) процесса окисления.

Для активации процесса низкотемпературного окисления алюминия водой разрабатываются различные физико-химические способы: термический, химический, использование жидких сплавов металлов и т.д. [2]. В числе физических способов активации находится предложенная нами УЗ активация [3]. Было показано, что ультразвук способен эффективно активировать процесс окисления алюминия водой. Использование УЗ активации позволяет не только увеличивать скорость окисления алюминия и достигать 100% окисления микронных алюминиевых порошков, но и управлять структурой образующихся твердых продуктов окисления (гидроксидов алюминия). Последнее существенно расширяет возможности утилизации твердых продуктов окисления металла.

УЗ активация позволяет проводить окисление «чистого» алюминия, не загрязняя продукты окисления посторонними примесями (химическими активаторами). Она может быть использована для одновременного получения водорода и «чистых» гидроксидов алюминия, чрезвычайно востребованных другими отраслями современной индустрии.

Результаты исследований показали, что совместное использование УЗ активации и химической (малые добавки CaO) активации позволяет существенно уменьшить период индукции и увеличить скорость окисления алюминия. При этом результирующее увеличение скорости окисления от одновременного воздействия двух способов активации является не просто суммой результатов от воздействия каждого способа. В опытах наблюдается синергетический эффект от совместного использования двух типов активаций [4]. Подобная комплексная активация процесса окисления может быть использована в случае, если необходимо осуществить быстрый запуск процесса окисления при обеспечении высоких скоростей генерации водорода.

## 2. Используемые материалы и оборудование

В качестве исходных реагентов использовался Al порошок АСД-4 производимый серийно Российской промышленностью или его аналоги: порошки типа АД-4 со средним размером частиц ~ 4 мкм и дистиллированная вода. В качестве химического активатора использовалась окись кальция CaO марки ХЧ (содержание CaO не менее 99% масс.).

Для проведения исследований были сконструированы и изготовлены два типа экспериментальных установок, различающихся способом ввода УЗ поля в реактор и, соответственно, различной конфигурацией активирующего УЗ поля. Подробное описание этих

установок приведено в работе [4]. В установке первого типа реактор со смесью реагентов погружался в наполненную водой УЗ ванну. УЗ поле генерировалось в объеме воды генератором, вмонтированным в дно ванны. Таким образом, УЗ поле проникало внутрь реактора через его стенки. Установка была сконструирована на основе УЗ ванны «Сапфир» (модель ПСБ-1335-5) с электрической мощностью 50Вт, питающей УЗ генератор, работающий на частоте 35 кГц. В установке второго типа УЗ поле вводилось непосредственно в реактор с помощью рабочего тела (грибовидного активатора), соединенного с генератором УЗ колебаний и погруженного в реакционную смесь. Установка была сконструирована на основе УЗ аппарата Муза-0.1/22М с рабочей частотой 22 кГц и максимальной потребляемой электрической мощностью 100 Вт (95 Вт/см<sup>2</sup> по отношению к поверхности рабочего инструмента УЗ генератора). Аппарат позволял плавно изменять мощность УЗ поля в диапазоне от 5 до 100% от максимальной мощности. Удельная мощность УЗ поля, вводимая в объем реакционной смеси в установке второго типа, могла в 3 - 10 раз превышать аналогичный параметр для установки первого типа. Соответственно, при этом вклад термической активации, всегда сопутствующей УЗ обработке, для установки второго типа оказывался заметно выше.

Частицы исходных алюминиевых порошков, а также твердые продукты их окисления исследовались методами сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-7401F и методами рентгенофазового анализа на дифрактометрах D8 ADVANCE, DRON-3 (CuКα излучение). Для определения степени окисления и состояния поверхности алюминиевых частиц на различных стадиях окисления производился их отбор из реактора в заданные моменты времени. Извлеченные из реактора влажные образцы быстро высушивались потоком сухого воздуха при комнатной температуре для остановки процесса окисления и последующего анализа инструментальными методами.

### *3. Полученные результаты*

В работах [4-5] нами было проведено комплексное изучение УЗ воздействия на процесс окисления алюминия водой в различных тепловых режимах (в т.ч. квазизотермическом, позволяющим оценить эффективные энергии активации процесса [4]) при различных мощностях и конфигурациях УЗ поля. В частности, было показано, что использование УЗ активации позволяет достигать близких к 100% степеней окисления металлического алюминия [3-5], а кинетические кривые газовыделения водорода в большинстве случаев имеют два хорошо выраженных максимума.

Для выяснения особенностей окисления алюминиевого порошка в присутствии УЗ поля и с целью установления природы второго максимума было проведено исследование превращения алюминиевых частиц во время протекания разных стадий реакции окисления. Окисляемые частицы изымались из реактора в заданные моменты времени и исследовались с помощью РЭМ и РФА. Полученные данные показывают, что в течение первого максимума газовыделения образуются аморфный гидроксид алюминия. По-видимому, в процессе окисления в среде вокруг окисляемой поверхности металла в зонах сквозных дефектов образуются мицеллы гидроксида алюминия, которые по мере увеличения их концентрации объединяются в водонасыщенный гель. Последний с течением времени теряет молекулы избыточной воды, структурируется (стареет), теряет способность пропускать воду к не окисленному алюминию, что приводит к замедлению процесса окисления. В составе продуктов, образующихся на стадии второго максимума газовыделения, обнаруживаются хорошо сформировавшиеся столбчатые кристаллы гидроксида алюминия. Результаты РФА показывают, что они представляют собой кристаллы гиббсита и байерита, которые, по-видимому, образуются при кристаллизации растворенных форм гидроксида алюминия. Таким образом, можно предположить, что во время формирования второго максимума имеет место образование ионных форм растворенного гидроксида алюминия, их транспортировка в область роста кристаллических форм гидроксида и последующий рост кристаллов.

При совместном использовании УЗ и химической активации достигается быстрое и полное окисление, а кинетические кривые газовыделения имеют 1 максимум. Изучение продуктов реакции методами РЭМ и РФА показало, что продуктами реакции являются

наноразмерные кристаллы гидроксида алюминия, что свидетельствует об интенсивном зародышеобразовании кристаллов при данных условиях окисления.

Кроме изучения механизма в настоящей работе были изучены некоторые практические аспекты совместного использования УЗ и химической активации. В частности, установлено, что увеличение количества активатора вплоть до 4-5% от массы Al приводит к сокращению периода индукции и увеличению скорости окисления алюминия, дальнейшее увеличение количества активатора с 4 до 20% не приводит к изменению кинетических кривых окисления в пределах погрешности. Это означает, что при совместном использовании методов УЗ и химической активации увеличение количества активатора CaO более 5% от массы Al нецелесообразно.

Было проведено изучение влияние количества окислителя (воды) на параметры кинетических кривых выделения H<sub>2</sub>. Количество воды изменялось в диапазоне 4.5-30 мл при 2 г Al порошка и 0.1 CaO. Эксперименты проводились установке первого типа при постоянно включенном УЗ поле. Увеличение относительного количества воды ведет к увеличению периода индукции и увеличению продолжительности периода интенсивного окисления. При этом во всех случаях достигается близкое к 100% окисление металла. Анализ зависимостей температур реагентов внутри реактора и воды в УЗ ванне от времени для этих экспериментов показал, что в отсутствие реакции скорость нагревания реагентов (смесь: Al порошок – вода – активатор CaO) УЗ полем не зависит от состава смеси и определяется скоростью нагревания воды в УЗ ванне. В тоже время скорость нагревания реагентов за счет выделяющегося при окислении тепла зависит от массы воды в реакторе и обратно пропорционально ей. Таким образом, в установке первого типа наибольшие скорости окисления достигаются за счет саморазогрева реагентов в процессе реакции при соотношении реагентов близком к стехиометрическому. а увеличение количества окислителя замедляет процесс окисления.

### Литература

1. Ларичев М.Н., Ларичева О.О., Лейпунский И.О., Пшеченков П.А. Реакция алюминиевых частиц с жидкой водой и водяным паром – перспективный источник водорода для нужд водородной энергетики // Известия РАН, сер. «Энергетика». 2007. №5. С. 125-139
2. Е.И. Школьников, А.З. Жук, Б.М. Булычев, М.Н. Ларичев, А.В. Илюхина, М.С. Власкин. Окисление алюминия водой для эффективного производства электроэнергии / Под ред. А.Е. Шейндлина. М: Наука, 2012. 173 с.
3. М.Н.Ларичев, Н.С. Шайтура, О.О. Ларичева. Влияние УЗ поля на окисление водой Al порошков // Химическая физика, т. 27, №9, 2008, с. 95-98.
4. М.Н. Ларичев, Н.С. Шайтура, В.Н. Колокольников, О.О. Ларичева, Е.И. Школьников. Окисление алюминиевого порошка АСД-4 водой. Возможности химической и физической активации процесса, получение наноразмерных продуктов окисления. // Известия Академии Наук серия Энергетика, №2, стр. 85-104. Москва, 2010.
5. М.Н. Ларичев, Н.С. Шайтура, В.Н. Колокольников, О.О. Ларичева, Е.И. Школьников, В.В. Артемов. Получениеnanoструктурных продуктов при окислении микронного порошка алюминия водой в ультразвуковом поле // Перспективные материалы № 9, с. 289-293, 2010.

# ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

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

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск  
shaluniv@btu.secna.ru

При наложении механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты на тонкую пленку жидкости на ее поверхности возникает сеть капиллярных волн, с гребней которых может происходить отрыв капель жидкости. Этот процесс называется ультразвуковым распылением. Известно [1], что при ультразвуковом распылении производительность процесса и дисперсные характеристики формируемых капель жидкости зависят от режимов (частота и амплитуда колебаний распылительной поверхности), свойств жидкости (вязкость, поверхностное натяжение), а также толщины слоя жидкости, покрывающей распылительную поверхность. Наличие таких зависимостей позволяет управлять размером капель и производительностью распыления за счет изменения частоты и амплитуды воздействия.

Для решения этой задачи необходимо последовательно рассмотреть процессы, происходящие в слое распыляемой жидкости, с учетом влияния на них физических свойств жидкости и режимов ультразвукового воздействия. Среди множества теоретически возможных механизмов УЗ распыления жидкости наиболее исследованным и экспериментально подтвержденным является кавитационно-волновой механизм, согласно которому капиллярные волны образуются на поверхности пленки жидкой за счет захлопывания кавитационных пузырьков (рис. 1).

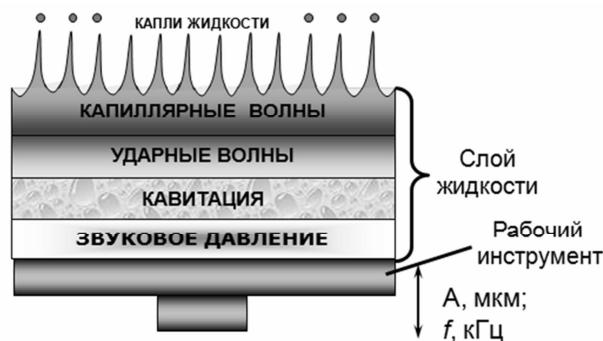


Рис. 1. Схематичное изображение кавитационно-волнового механизма образования капель в слое распыляемой жидкости

С энергетической точки зрения очевидно, что энергия УЗ колебаний, создаваемых излучающей (колеблющейся) поверхностью, претерпевает ряд преобразований. Первоначально энергия первичного воздействия (ультразвуковых колебаний) концентрируется в энергию высокой плотности в виде периодических высокоамплитудных ударных волн взрывающихся кавитационных пузырьков. Затем энергия ударных волн, распространяясь по толщине слоя жидкости, достигает свободной поверхности «жидкость-газ», переходя в поверхностную энергию капиллярных волн и в увеличение свободной поверхности жидкости из-за отрыва капель от гребней капиллярных волн.

Поскольку в слое жидкости звуковое давление достигает наибольшей величины вблизи колеблющейся поверхности [2], практический интерес представляет формирование кавитационных пузырьков в области, непосредственно граничащей с поверхностью ультразвукового излучателя. В связи с этим уравнение Кирквуда-Бете, описывающее

колебания стенок кавитационного пузырька, было уточнено для случая развития кавитации в тонком слое жидкости (1):

$$R\left(1-\frac{1}{C}\frac{\partial R}{\partial t}\right)\frac{\partial^2 R}{\partial t^2}+\frac{3}{2}\left(1-\frac{1}{3C}\frac{\partial R}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2=\left(1+\frac{1}{C}\frac{\partial R}{\partial t}\right)H+\frac{R}{C}\left(1-\frac{1}{C}\frac{\partial R}{\partial t}\right)\frac{\partial H}{\partial t},$$

$$H=\frac{n}{n-1}\frac{(p_0+B)^{\frac{1}{n}}}{\rho_0}\left[\left(p_0-\rho_0\omega^2 A h \sin(\omega t)+B\right)^{\frac{n-1}{n}}-\left(p_{g0}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma}-\frac{2\sigma}{R}-\frac{4\mu}{R}\frac{\partial R}{\partial t}+P_v+B\right)^{\frac{n-1}{n}}\right], \quad (1)$$

где  $C$  – локальная скорость звука в жидкости, м/с;  $H$  – энталпия жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $R$  – радиус пузырька, м;  $n$  – постоянная, равная 7;  $B$  – постоянная, равная 3000 Па;  $p_0$  – равновесное давление жидкости, Па;  $p_{g0}$  – равновесное давление газа, Па;  $R_0$  – радиус кавитационного зародыша, м;  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\text{мПа}\cdot\text{с}$ ;  $P_v$  – давление насыщенных паров, Па;  $t$  – время с начала воздействия, с;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $\text{Дж}/\text{м}^2$ ;  $\gamma$  – показатель адиабаты для воздуха.

При схлопывании кавитационного пузырька вблизи колеблющейся поверхности генерируется ударная волна, распространяющаяся по толщине слоя жидкости. Данное явление аналогично явлению подводного взрыва, возникающего на глубине морской воды, при наличии в ней газовой полости. Поэтому для определения амплитуды давления ударной волны во фронте, когда волна достигнет свободной поверхности жидкости, используется трансформированное выражение, полученное Р. Коулом в результате исследований подводного взрыва (2):

$$P_m = \frac{\rho_0 c^2}{\sqrt{2}} \sqrt{\theta \frac{c P_1 R_{\min}}{B(n-1)}} \cdot \frac{1}{h \ln(h/R_{\min})} \quad (2)$$

где  $\theta$  – время схлопывания кавитационного пузырька, с;  $P_1$  – максимальное давление при захлопывании кавитационного пузырька, Па;  $R_{\min}$  – минимальный радиус кавитационного пузырька при захлопывании, м, определяемый на основании уравнения Кирквуда-Бете;  $h$  – толщина слоя жидкости, м.

На основе полученных уравнений установлено, что в широком диапазоне режимов УЗ воздействия и физических свойств распыляемой жидкости всегда существует оптимальная толщина слоя, при которой амплитуда давления ударной волны будет максимальной. Поскольку амплитуда давления ударной волны определяет энергию, сообщаемую свободной поверхности и расходуемую далее на образования капель, то можно считать, что при оптимальной толщине слоя будет достигнута и максимальная производительность распыления [2].

Профиль капиллярных волн, определяется течением жидкости вблизи границы «жидкость-газ», с которой происходит отрыв капель. Это течение описывается уравнениями Навье-Стокса с граничными условиями капиллярного скачка на свободной поверхности. Диаметр капель определяется на основании найденного профиля капиллярной волны с использованием теории распада струй Релея, которая является справедливой ввиду цилиндрически симметричной формы гребня волны [3]:

$$D = 1,89 D_{avg} = 3,68 \frac{\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \left( \xi(x) - \xi\left(\frac{\lambda}{2}\right) \right) dx}{\xi(0) - \xi\left(\frac{\lambda}{2}\right)}. \quad (3)$$

где  $D_{avg}$  – средняя толщина гребня капиллярной волны по высоте, м.

В свою очередь удельная производительность (на единицу площади распылительной поверхности) определяется по формуле (4):

$$\Pi = VfN_s = a(\lambda^2 A/2\pi) \cdot (\pi^2/2 - 2)fN_s = aN_s \frac{P_m \theta}{2\pi\rho} \sqrt{\frac{\lambda c \theta (\pi^2 - 4)^2}{4\pi^2 \left( \frac{\pi^2}{4} - \frac{1}{8} \right)}}, \quad (4)$$

где  $a$  – поправочный коэффициент, учитывающий долю объема капиллярной волны, распадающейся на капли, и принятый равным 1 при теоретических расчётах;  $N_s$  – количество капиллярных волн на единицу площади поверхности, определяемое концентрацией кавитационных пузырьков;  $V$  – объем жидкости, отделившейся от капиллярной волны, м<sup>3</sup>.

Рассчитанные зависимости диаметров формируемых капель от свойств жидкости и амплитуды УЗ воздействия представлены на рисунке 2. Для каждого набора значений режимов воздействия и свойств распыляемой жидкости толщина слоя выбиралась оптимальной, при которой амплитуда давления ударной волны будет максимальна [4].

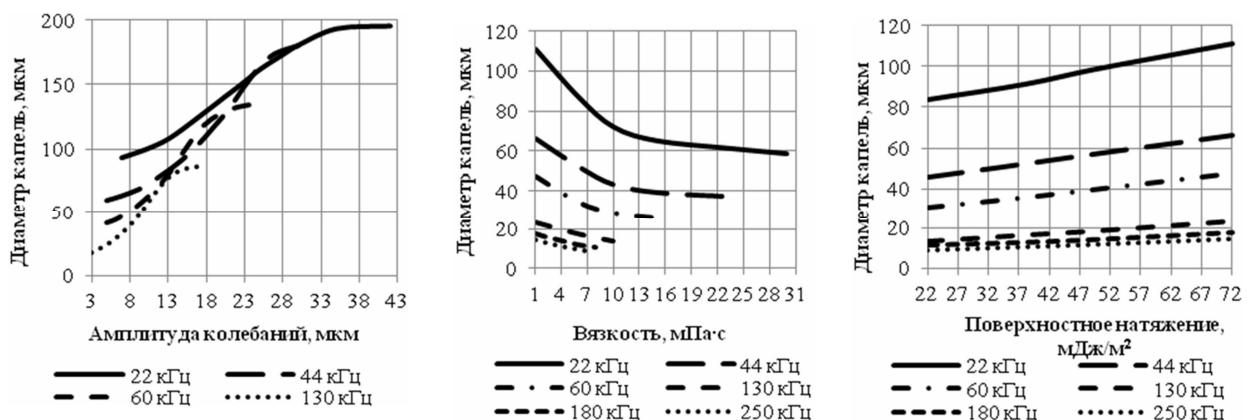


Рис. 2. Зависимости диаметра формируемых капель (мкм) жидкости от амплитуды колебаний (мкм) (а), поверхностного натяжения (мН/м) (б) и амплитуды колебаний (мкм) (в) при различных частотах (кГц)

Из представленных зависимостей следует, что диаметр формируемых капель нелинейно зависит от амплитуды колебаний распылительной поверхности (рис. 2а). Для каждой из исследуемых зависимостей существует определенная амплитуда колебаний, при превышении которой дальнейшее увеличение диаметра формируемых капель не происходит из-за ограниченности средней толщины капиллярных волн  $D_{avg}$  длиной волны  $\lambda$  (3). В целом, полученные зависимости могут служить основой для определения технических требований (частоты и амплитуды УЗ воздействия) к распылителям, обеспечивающим формирование аэрозоля с заданной дисперсностью.

## Литература

1. Розенберг Л.Д. Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1970. 685 с.
2. Khmelev V.N., Shalunov A.V., Golykh R.N., Shalunova A.V., Genne D.V. The investigation of modes of ultrasonic influence for atomization of liquids with specified dispersivity and productivity // EDM'2012: Conference Proceedings. 2012. P. 188-194.
3. Balik G. The use of air atomizing nozzles to produce sprays with fine droplets / 14th International Water Mist Conference. 2014. 7 p.
4. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев С.С., Цыганок С.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии. Барнаул: Издательство АлтГТУ, 2015. 687 с.

# ВЫБОР УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Загидуллина Ю.Р., Самигуллина А.А., Жиляев А.П., Назаров А.А.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа  
rzaeva.yulia2013@yandex.ru

## *Введение*

Воздействие ультразвуковых колебаний на металлические материалы в зависимости от параметров обработки и исходного состояния материала может приводить к различным эффектам. В настоящее время, например, широко применяется эффект упрочнения поверхности металлов под действием ультразвуковой обработки (УЗО) [1].

УЗО объемных образцов может приводить как к упрочнению, так и к релаксации структуры материала [2]. Также возможно локализованное воздействие ультразвуковой волны [3]. Несмотря на широкое применение УЗО, многие вопросы, связанные с появлением новых видов обработки металлов, таких как интенсивная пластическая деформация (ИПД), и с комбинированием этих методов с УЗО, остаются малоизученными.

В настоящей работе проводится исследование влияния различных условий УЗО на акустический контакт и, как следствие, на качество проработки структуры ультрамелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением.

## *Материал и методика исследования*

Исследовали образцы технически чистого (99,5%) никеля НП-2 полученные методом кручения под квазигидростатическим давлением (КГД) 6 ГПа на наковальнях Бриджмена при комнатной температуре (исходное состояние №0). Полученные образцы имели диаметр 11 мм и толщину 0,35 мм.

УЗО осуществлялась по схеме, приведенной на рис. 1. Ультразвуковой преобразователь 2, питающийся от генератора 1, возбуждает в полуволновом инструменте 3 стоячую волну, которая имеет пучность напряжений в месте расположения образца 4. Образец с помощью прижимного цилиндра 5, имеющего резьбу, плотно зажат внутри концентратора и таким образом составляет часть колебательной системы.

В работе изучали влияние на акустический контакт подкладок 6 из меди (образец № 1) и баббита (образец № 3). Один из образцов, зажатый между медными подкладками, также был смазан тонким слоем солидола (образец № 2). Амплитуда сдвигающего напряжения во всех случаях составила приблизительно 50 МПа, время обработки – 30 с.

Микроструктура исследовалась методом ПЭМ на микроскопе JEM 2000EX. Фольги для электронномикроскопических исследований готовили стандартными методами на приборе для струйной полировки TenuPOL (Struers). EBSD-анализ проводился с помощью микроскопа TESCAN MIRA 3 LMH FEG с приставкой для EBSD-анализа «CHANNEL 5». Съемку осуществляли в пошаговом режиме с шагом 50 нм с площади соответственно 100 мкм<sup>2</sup>. Поверхность образцов для съемки готовилась с помощью электролитической полировки. Измерение микротвердости по Виккерсу проводили на установке Axiovert100A с приставкой МНТ-10 при нагрузке индентора 100г и времени выдержки 10 с.

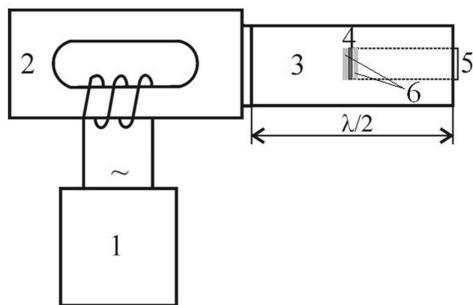


Рис. 1. Схема ультразвуковой обработки никеля, подвергнутого кручению под высоким давлением. 1-генератор ультразвуковых колебаний, 2-преобразователь, 3-концентратор, 4-образец, 5-прижимной цилиндр, 6-подкладки.

### *Результаты эксперимента*

Результаты EBSD анализа, измерения микротвердости и ПЭМ-изображения для образцов № 1-4 приведены в таблице 1 и на рис.2.

Таблица 1. Результаты EBSD анализа и измерения микротвердости

Образец №	Средний размер зерен и фрагментов, $\mu\text{м}$		Средний угол локальной разориентации, характеризующий плотность дислокаций (по результатам EBSD)			График зависимости микротвердости (МПа) от расстояния до центра образца (мм)
	по методу секущих	средний диаметр	центр образца	середина радиуса	край образца	
1 – КГД без УЗО	0.42	0.31	0.7633	0.7024	0.6131	
2 – УЗО с медными подкладками, без смазки	0.41	0.30	0.8235	0.7671	0.6996	
3 – УЗО с медными подкладками, смазка – солидол	0.48	0.34	0.6450	0.7227	0.8127	
4 – УЗО с баббитовыми подкладками	0.38	0.30	0.8581	0.8616	0.6582	

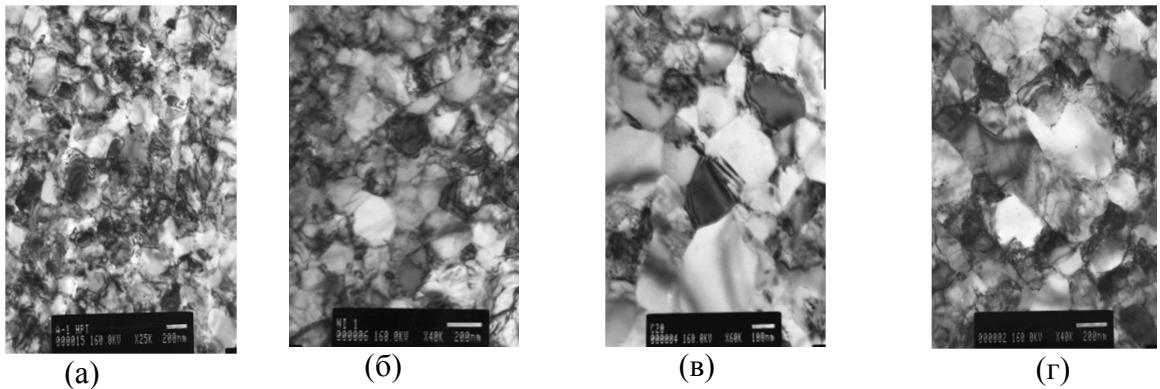


Рис. 2. Микроструктура образцов после КГД (а), после УЗО с медными подкладками без смазки (б) и со смазкой (в) и с баббитовыми подкладками (г).

Из табл. 1 видно, что в образце № 2 произошел небольшой рост зерна. Рост микротвердости от центра образца к краю равномерный. Микроструктура в середине радиуса образца состоит из равноосных зерен с полосовым контрастом, характерным для отожженного состояния (рис. 2в). В образцах № 1 и 3 также наблюдается равномерное увеличение микротвердости по радиусу образца, но их структура более неравновесна: зерна имеют сложный внутренний контраст, а границы зерен неровные и нечеткие (рис. 2а,б,г). Кроме того, заметно, что во всех трех случаях был проработан центр образца: микротвердость в центральной точке во всех случаях выше, чем в исходном состоянии после кручения (табл. 1, последний столбец). Средний угол локальной разориентировки, рассчитанный по данным EBSD анализа, в образце № 2 также значительно ниже, чем в остальных образцах, что свидетельствует о снижении средней плотности дислокаций.

### Выводы

Для наилучшей проработки структуры образцов цилиндрической формы оптимальным является использование между инструментом и образцом тонких медных подкладок с небольшим количеством смазки (например, солидола).

Работа была поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

### Литература

- Колобов Ю.Р., Кашин О.А., Дударев Е.Ф., Грабовецкая Г.П., Почивалова Г.П., Клименов В.А., Гирсова Н.В., Сагымбаев Е.Е. Влияние ультразвукового деформирования поверхности на структуру и механические свойства поликристаллического и наноструктурного титана // Известия вузов. Физика. 2000. № 9. С.45-50.
- Samigullina A.A., Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V. and Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // Rev.Adv.Mater.Sci. 2014. No 1/2. Vol. 39. P. 48-53.
- Клячин В.М., Николаев В.В., Носкова Н.И., Пономарева Е.Г. Локальное изменение субструктуры алюминия и сплава Al-11 вес./% Mg под воздействием сфокусированных ультразвуковых волн // ФММ. 1991. № 6. С. 186-196

# АППАРАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Хмелёв В.Н.<sup>1</sup>, Сливин А.Н.<sup>1</sup>, Абрамов А.Д.<sup>2</sup>, Хмелёв М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Бийский технологический институт АлтГТУ, Бийск

<sup>2</sup>ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск

Разнообразие видов пищевых продуктов, жесткие требования к обеспечению сохранности, а также необходимость обеспечения «товарного вида» при представлении Покупателю определяют разнообразие способов исключению внешних воздействий и видов потребительской упаковки (тары) [1].

Основные виды упаковки, применяемой в пищевой промышленности, могут быть условно классифицированы следующим образом:

1. Мягкая упаковка, формируемая из плёночных материалов в виде пакетов для хранения сыпучих, пастообразных и жидких продуктов.

2. Упаковка из листовых материалов: коробки, устойчивые пакеты, кассеты, банки, стаканчики для хранения сыпучих, жидких и пастообразных продуктов.

3. Выдувная упаковка из полимерных материалов в виде туб и бутылей для упаковки и хранения жидких, сыпучих, пастообразных и твёрдых, газированных напитков, пищевых химических продуктов.

4. Литьевая и прессованная потребительская тара: банки, коробки, пеналы, пробирки, блистеры и контейнеры для различных продуктов.

5. Упаковка из вспененных полимерных материалов для сохранения биологических свойств пищевых продуктов.

Поскольку основной целью упаковки пищевых продуктов является сохранение количества, качества и полезных свойств продуктов, защита от внешнего воздействия и вредных факторов, в большинстве случаев процесс упаковки призван обеспечить герметизацию продукта при помощи формируемых различными способами сварных швов. Одним из наиболее эффективных способов формирования герметизирующего шва является ультразвуковая (УЗ) сварка [2].

Разнообразие видов упаковки требует выполнения различных по конфигурации и размерам швов (точечные, заклепочные, линейные, кольцевые, по сложной траектории или замкнутому контуру). Необходимость формирования таких швов обуславливает необходимость использования разных способов подведения энергии УЗ колебаний к зоне формирования шва – либо непрерывно через небольшую контактную поверхность при формировании протяжённого шва необходимой длины, либо кратковременно через значительную контактную поверхность (прессовый способ сварки). [3].

Наибольшая потребность современной промышленности при упаковке пищевых продуктов в тару из мягких плёночных и листовых материалов путем формирования непрерывных протяжённых сварных швов удовлетворяется аппаратами, аналогичными представленным на рис. 1.



Рис. 1. Ультразвуковые аппараты для формирования протяжённых непрерывных сварных швов

Такие аппараты обеспечивают формирование непрерывных сварных швов шириной от 2 до 30 мм с высокой скоростью (до 1,5 м/с) за счет ультразвукового воздействия с амплитудой колебаний не менее 80 мкм.

Упаковка продуктов в мягкую пленочную тару, в тару из листовых материалов, в выдувную тару (тубы), в литьевую и прессованную тару осуществляется формированием линейных сварных швов [4,5]. На рис. 2. представлены аппараты, обеспечивающие формирование линейных сварных швов длиной до 360 мм при ширине шва до 12 мм за время от 0,3 до 1,5 с.



Рис. 2. Сварочные аппараты для сварки линейных швов

При герметизации выдувной и литьевой прессованной тары, блистеров и контейнеров для пастообразных, жидких и других различных продуктов были разработаны аппараты серии «Гиминей-К» для сварки швов по замкнутому кольцевому контуру (Рис. 3). Применение таких аппаратов обеспечивает формирование сварных соединений кольцевой формы диаметром от 15 мм до 100 мм с шириной сварного шва до 16 мм [6,7].



Рис. 3. Сварочные аппараты для прессовой сварки кольцевых швов

Создание специализированного оборудования на основе таких аппаратов, например, позволяет обеспечить герметизацию и приварку клапанов для закручивающейся крышки на картонных коробках для жидких пищевых продуктов, сока, молочных продуктов.

Многообразие объектов упаковки, форм и конструкций упаковки, необходимость обеспечения высокой производительности процесса упаковки обуславливает необходимость создания и применения автоматизированных линий, примеры которых представлены на рис. 4.

Для автоматической упаковки пастообразных продуктов в порционную упаковочную тару, с одновременным формированием протяженных непрерывных сварных швов, дозировкой продукта, формированием поперечных сварных швов и обрезкой была разработана автоматизированная линия «Гиминей» АУС 0,4/22-ом. В состав линии входит два аппарата для формирования непрерывных швов, два аппарата для формирования поперечных линейных швов. Для упаковки различных продуктов в блистерную упаковку различной формы была разработана автоматизированная линия, обеспечивающая формирование протяженного сварного шва по сложному контуру пошаговым способом [8]. Входящий в состав аппарата блок управления позволяет выбирать контур формируемого шва.

Создаваемые автоматизированные линии способны обеспечить формирование сварных швов любых видов. Производительность процесса формирования швов определяется видом потребительской упаковки, свойствами материалов, размерами формируемого сварного шва и амплитудой ультразвукового воздействия [9].

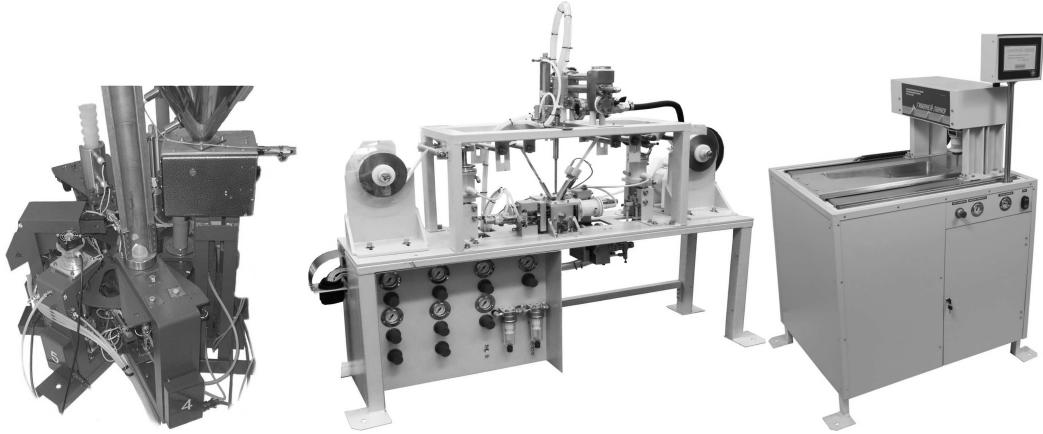


Рис. 4. Автоматизированные линии для упаковки пищевых продуктов

Разработанные ультразвуковые аппараты и созданные на их основе упаковочные линии обеспечивают герметизацию всех видов потребительской тары для упаковки пищевых продуктов за счет формирования герметичных сварных швов различной конфигурации, и протяженности. Разработанное и представленное оборудование является универсальным для сварки различных по свойствам полимерных упаковочных материалов и имеет возможность встраивания и согласования со стандартными автоматизированными упаковочными линиями.

#### Литература

1. ГОСТ 17527-2003 Упаковка. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2003.
2. Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Абрамов А.Д., Хмелёв С.С. Ультразвуковая сварка термопластичных материалов. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – 281 с.
3. Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Абрамов А.Д. Повышение эффективности энергетического воздействия при ультразвуковой сварке. – Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 278-281.
4. Способ герметизации пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидким продуктов: пат. 2276014 РФ / Хмелёв В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Лебедев А.Н., Хмелёв М.В., Левин С.В., заяв. 07.12.2004
5. Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Савин И.И., Левин С.В. Разработка ультразвукового оборудования для упаковочных машин. – Известия Тульского государственного университета. Серия: «Технологическая системотехника». – Тула, 2006. – Вып. 6. – С. 12–18.
6. Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Левин С.В. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой сварки элементов картриджа для очистки воды. – Известия Тульского государственного университета. Серия: «Технологическая системотехника». Тула, 2004. № 2. С. 175-182.
7. Способ герметизации картриджей для очистки воды: пат. 2241599 РФ / Хмелёв В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В., Савин И.И., Хмелёв М.В., Левин С.В., заяв. 11.12.2003
8. Устройство ультразвуковой сварки изделий по сложному контуру: пат. 142905 РФ Хмелёв В.Н., Хмелёв С.С., Хмелёв М.В., Генне Д.В., Абраменко Д.С., Сливин А.Н., Абрамов А.Д., Левин С.В., заяв. 26.03.2014
9. Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D., “Perfecting of the Technology and Development of the Apparatuses for Ultrasonic Welding,” 14<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM, 2013, pp. 182–186, July 2013.

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА УПРОЧНЕННОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА

Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. мл.

ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск  
УО «Витебский государственный технологический университет»  
ita@vitebsk.by

Для производства металлических полуфабрикатов из сплавов с памятью формы традиционно используется термомеханическая обработка, включающая горячее прессование, ротационную ковку, прокатку, холодное волочение [1]. При этом существует проблема одновременного повышения деформируемости и функциональных свойств сплава, поскольку первое достигается за счет высоких температур обработки, что в свою очередь приводит к ухудшению второго. Одним из подходов к решению данной задачи является применение внешних энергетических воздействий, не сопровождаемых воздействием высоких температур.

В сплавах с термоупругим мартенситным превращением деформационно-термические методы обработки в сочетании с импульсным током (электропластический эффект) [2] или ультразвуковым воздействием [3] действительно позволяют существенно повысить технологические и эксплуатационные свойства, однако механизм такого воздействия недостаточно изучен. Кроме того, интерес представляет совместное действие обоих эффектов. Например, для чистой меди было показано, что комбинация электропластического (ЭПЭ) и акустопластического (АПЭ) эффектов, может оказывать заметное влияние на дислокационную подвижность и деформационное поведение материала [4]. В этой работе было также показано, что совместное действие ЭПЭ и АПЭ меньше, чем сумма эффектов по отдельности и зависит от фазового состояния материала.

В работе [5] представлен способ для ультразвукового электропластического плющения проволоки из вольфрама и других труднодеформируемых металлов и сплавов, который предусматривает одновременное использование в зоне деформации электрического тока и ультразвука. Отмечается, что при ультразвуковом воздействии на процесс плющения достигаются высокие степени единичного обжатия - в несколько десятков процентов (до 88-90%) без растрескивания материала.

Ранее нами показано [6], что за счет оптимальной комбинации (последовательной или одновременной) действия акусто- и электропластического эффекта на сплавы с памятью формы можно существенно снизить усилия деформирования и изменить микроструктуру материалов вплоть до наноструктурного состояния. Предложен способ комбинированной обработки проволоки импульсным током и ультразвуком.

Наложение ультразвуковых колебаний ведёт к снижению усилия волочения на 30- 40 % по сравнению с волочением в обычных условиях. С ростом степени деформации возрастает усилие волочения, причём при больших обжатиях (порядка 25%) происходит обрыв проволоки.

Установлено, что значение степени восстановления формы практически совпадают для случая волочения с наложением ультразвука и в обычных условиях. Термообработка проволоки после деформации менее 8% ведёт к полному возврату исходной формы, а после деформации выше 20% ЭПФ в значительной мере подавляется. Результаты измерений предела прочности показывают, что проволока, протянутая в обычных условиях и с наложением УЗК, имеет практически одинаковые прочностные свойства.

Ультразвуковая обработка образцов никелида титана после пластической деформации при различных условиях выполнялась по схеме, приведенной на рис. 1.

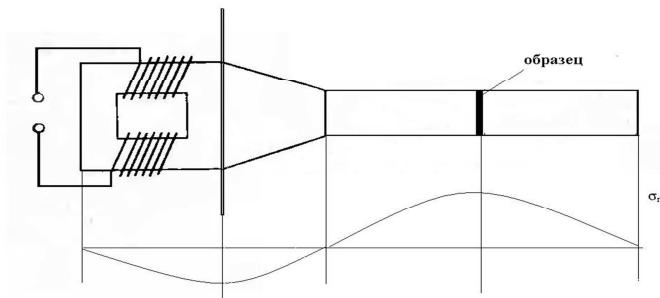


Рис. 1. Схема УЗО образцов никелида титана

Калориметрические эффекты (ДСК) в образцах нитинола, полученных после ультразвукового волочения и электропластической прокатки, исследовали с помощью синхронного термоанализатора фирмы NETZSCH STA 449 C Jupiter®. Измерения проводились при нагреве со скоростью 10 К/мин в атмосфере аргона. Калориметрия проводилась в два этапа: сначала в ходе нагрева с определенной скоростью до температуры 700°C записывалась кривая поглощения, затем образец охлаждался вместе с печью, затем повторно проводился нагрев того же образца с той же скоростью для записи базовой линии. Для анализа использовалась разница между линией поглощения и базовой линией.

На рис. 2 показаны ДСК кривые образцов нитинола после электропластической прокатки и последующей ультразвуковой обработки. В процессе калориметрических исследований было выполнено два цикла нагрева образца. Прокатка выполнялась с пропусканием импульсного тока. После прокатки была выполнена ультразвуковая обработка образца нитинола в пучности напряжений волновода. Амплитуда напряжений составляла 100 МПа, а время экспозиции 3 мин.

Из рис. 2а (кривая 1), видно, что после прокатки наблюдается 2 пика энергии при температурах 350 и 550 °C, которые исчезают после повторного нагрева образца (кривая 2).

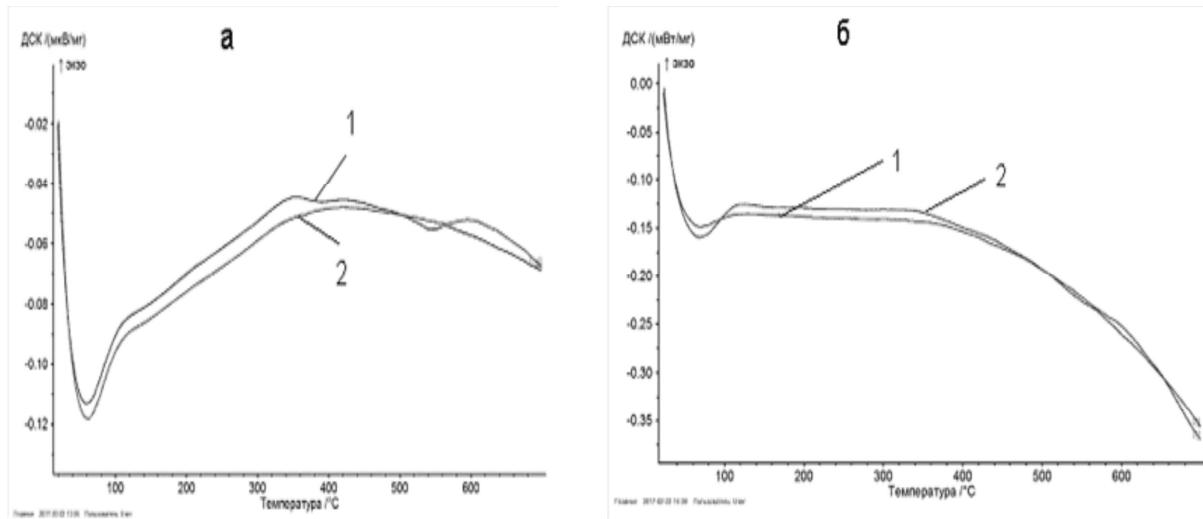


Рис. 2. Кривые ДСК образцов никелида титана после прокатки (а) и последующей ультразвуковой обработки (б); кривые 1 - первый цикл нагрева, кривые 2 - повторный нагрев

После ультразвуковой обработки нитинола (рис. 2б) кривые ДСК после 1 и 2 цикла нагрева практически совпадают, что свидетельствует о достижении в материале под действием ультразвуковой обработки аналогичного термическому.

При определенных режимах ультразвуковой обработки наблюдалось разрушение образцов никелида титана. Разрушенный участок деформированной проволоки никелида титана характеризуется многоочаговым характером разрушения, сильной шероховатостью. Высокая рельефность места разрушения образца говорит о вязком изломе, но при этом присутствуют участки сколов с блестящей гладкой поверхностью, что свидетельствует о наличии хрупкой составляющей излома, то есть в целом наблюдается смешанный излом (рис. 3).

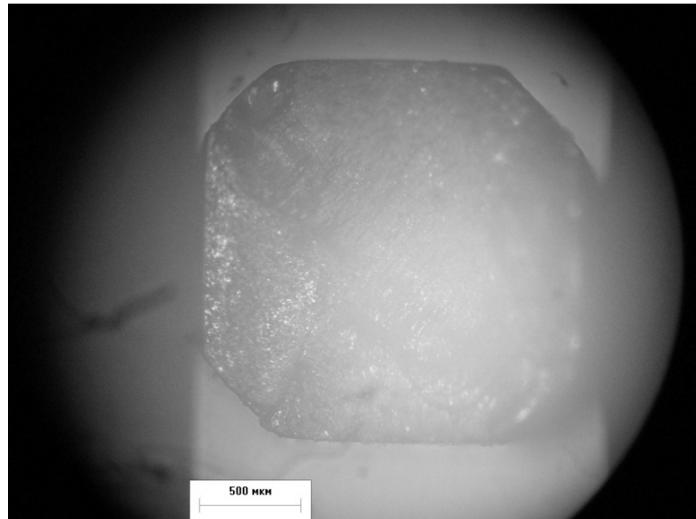


Рис. 3. Поперечное сечение образца деформированного никелида титана после разрушения под действием УЗО

Таким образом, ультразвуковая обработка является эффективным инструментом воздействия на упрочненный никелид титана.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Т16Р-152).

#### Литература

1. Андреев В.А., Хусаинов М.А., Бондарев А.Б. Технологические особенности получения проволоки из сплавов TiNi с эффектом памяти формы //Производство проката, №9, 2008, С.37-42.
2. Потапова А.А., Столяров В.В., Бондарев А.Б., Андреев В.А. Исследование возможности применения электропластической прокатки для получения прутков из сплава TiNi // Машиностроение и инженерное образование, №2, 2012, С.33-38.
3. Rubanik V.V., Rubanik V.V. jr., Dorodeiko V.G., Miliukina S.N., Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti-50,4 at.%Ni Alloy // Mater. Sci. Forum, V. 738-739 (2013), 362–366.
4. Kozlov A.V., Mordyuk B.N., Chernyashevsky A.V. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects // Mater. Sci.&Eng. A190 (1995), 75-79.
5. Троицкий О.А., Рыжков В.Г. Ультразвуковое электропластическое плющение трудно-деформируемых металлов и сплавов // Цветная металлургия. - 2009. - №11. - С. 37-38.
6. Столяров В.В., Мисоченко А.А., Рубаник В.В., Рубаник В.В.мл., Царенко Ю.В. Влияние импульсного тока и ультразвука на деформационное поведение в сплавах с памятью формы// Материалы Межд. конф. «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы». Витебск, УО «ВГТУ» – Витебск, 2016, С. 51-54.

# ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРУБОПРОВОДА СО СКОЛЬЗЯЩЕЙ ОПОРОЙ В СПЛОШНОЙ СРЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Хакимов А.Г., Шакирьянов М.М.

*Институт механики Уфимского научного центра РАН, Уфа  
shakmar9@mail.ru*

Пространственные периодические и непериодические колебания трубопровода под действием переменного внутреннего давления изучались в [1 - 3]. В основе указанных исследований лежит приближенная математическая модель, построенная в предположении малости деформаций трубы, которые связаны с ее выходом из плоскости изгиба. Для трубопровода с неподвижными опорами, окруженного сплошной средой, это изучение было продолжено в [4 - 6]. Получена оценка влияния частоты, начальной фазы, величины среднего давления и амплитуды переменного внутреннего давления в трубопроводе на его пространственные колебания. В [7] исследованы колебания механической системы, состоящей из двух вязкоупругих консольных полос, соединенных между собой упругим элементом. Одна из полос нагружена магнитным гармоническим силовым воздействием. Показано, что результаты аналитического решения и решения, полученного методом конечных разностей, дают хорошее согласие.

Рассматриваются пространственные колебания трубопровода со скользящей невесомой опорой под действием переменного внутреннего давления. Колебания трубопровода происходят вокруг оси, проходящей через две опоры, одна из которых считается неподвижной, а другая свободно скользит по идеально гладкой горизонтальной плоскости. Труба, заполненная несжимаемой транспортируемой средой, окружена вязкой несжимаемой жидкостью. Внутреннее давление в трубопроводе задается по гармоническому закону. Учитываются силы гравитации, силы инерции Кориолиса, выталкивающая сила Архимеда, силы вязкого сопротивления и силы, связанные с ускорением поперечного движения трубы в окружающей среде. При этом не учитываются скорость движения транспортируемой среды, трение потока и продольные силы инерции. В результате решение задачи приводится к интегрированию системы из двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих вращательные и изгибные колебания трубопровода. Функция, удовлетворяющая граничным условиям, берется по первой основной форме. Далее применением процедуры Бубнова – Галеркина эта система сводится к двум нелинейным обыкновенным дифференциальным уравнениям относительно угла поворота и прогиба средней точки пролета трубы от времени. Для интегрирования полученной системы уравнений при конкретных начальных условиях применяется численный метод Рунге–Кутта. Затем к этому численному решению применяются дискретное преобразование Фурье и отображение Пуанкаре.

Вычисления проводились для стального трубопровода, заполненного жидкостью. Трубопровод совершал колебания в воздушной и водной средах. Амплитуда, частота и начальная фаза переменной составляющей внутреннего давления принимали по одному значению, а величина среднего давления – три значения. В частности, на рис. 1 слева направо расположены графики зависимостей динамической составляющей прогиба средней точки пролета от времени, фазовые траектории, Фурье-спектры и отображения Пуанкаре, относящиеся к значениям среднего давления 1,08; 3,08; 5,08 МПа, соответственно, для трубопровода, совершающего колебания в воздушной среде.

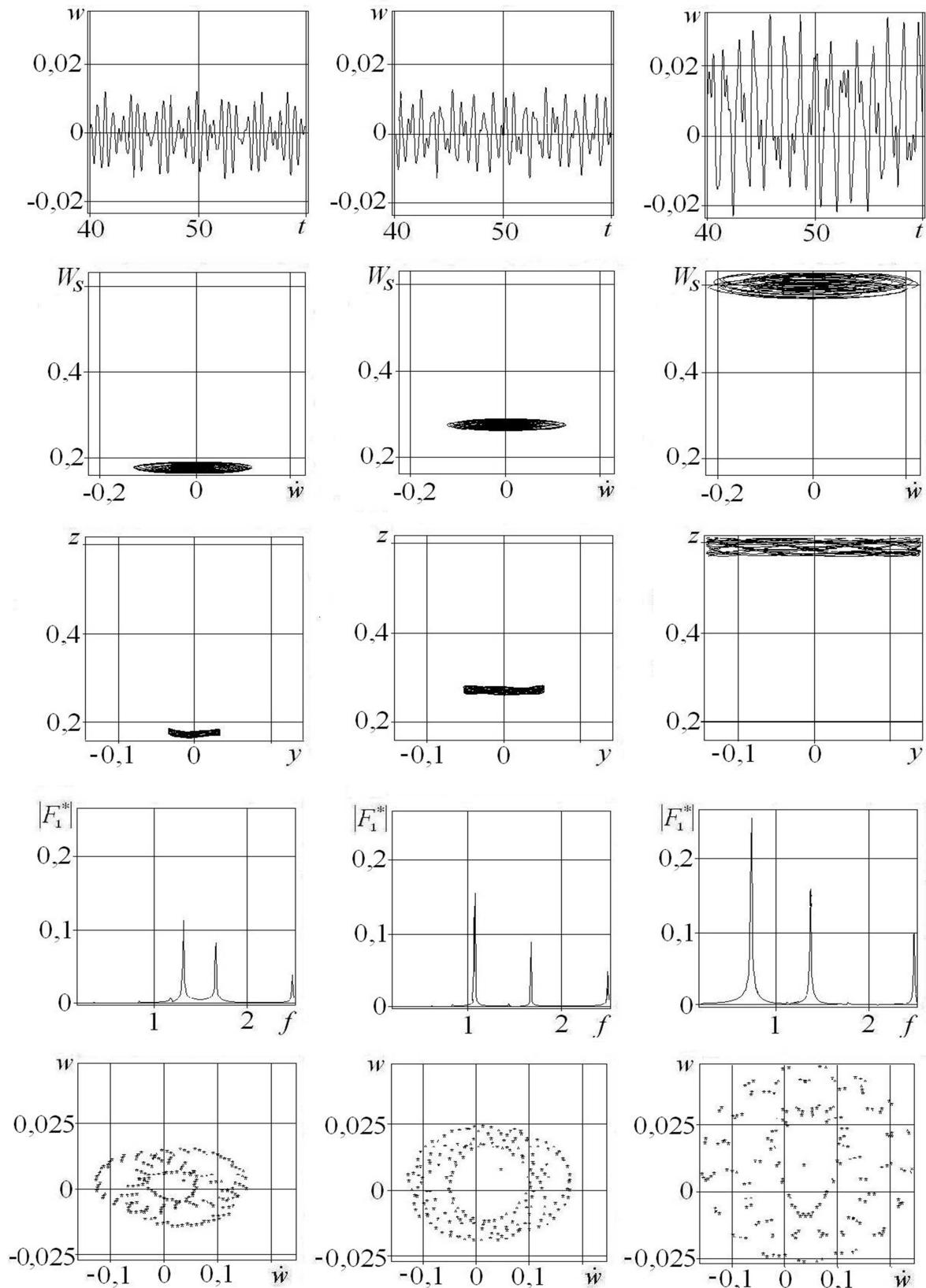


Рис. 1. Зависимости динамической составляющей прогиба  $w$ , м, от времени  $t$ , с, фазовые траектории,  $W_S$ , м,  $\dot{w}$ , м/с, проекция траектории средней точки пролета с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , м, на вертикальную плоскость  $y z$ , спектры частот,  $|F_1^*|$ , м·с, и отображения Пуанкаре изгибных колебаний трубы в воздушной среде при частоте  $f = 2.5$  Гц, амплитуде  $p_a = 0.15$  МПа, начальной фазе  $\phi_0 = 0$  рад и разных значениях  $p_0$  переменного внутреннего давления

Для более здравого представления движения трубопровода в пространстве построены также проекции траектории средней точки пролета на вертикальную плоскость, перпендикулярную оси вращения.

Анализ полученных результатов вычислений позволил сделать следующие выводы.

1. Установлено, что при всех принятых величинах среднего давления изгибные и вращательные колебания и горизонтальные колебания скользящей опоры трубы являются непериодическими.

2. Получено, что преобразование Фурье выделяет изгибные колебания трубы и колебательные движения ее скользящей опоры с тремя частотами. Одна из них совпадает с частотой колебаний переменного внутреннего давления, другая – с первой собственной частотой изгибных колебаний, а третья – с удвоенной первой собственной частотой вращательных колебаний трубопровода.

3. Показано, что амплитуды изгибно-вращательных колебаний трубы и горизонтальных колебаний ее скользящей опоры в воздушной среде значительно больше тех же амплитуд, чем при колебаниях в водной среде.

### Литература

1. Ильгамов М.А.. Колебания упругих оболочек, содержащих жидкость и газ. М., Наука, 1969. 180 с.
2. Ilgamov M.A., Tang D.M., E.H. Dowell. Flutter and forced response of a cantilevered pipe: The influence of internal pressure and nozzle discharge // J. of Fluids and Structures. 1994. Vol. 8, P. 139-156.
3. Tang D.M., Ilgamov M.A., E.H. Dowell. Buckling and post-buckling behavior of a pipe subjected to internal pressure. // J. of Appl. Mech. 1995. Vol. 62. № 3. P. 595 - 600.
4. Ганиев Р.Ф., Ильгамов М.А., Хакимов А.Г., Шакирьянов М.М. Пространственные колебания трубопровода в сплошной среде под действием переменного внутреннего давления // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016, № 6. С. 3 - 13.
5. Ганиев Р.Ф., Ильгамов М.А., Хакимов А.Г., Шакирьянов М.М. Пространственные непериодические колебания трубопровода под действием переменного внутреннего давления // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017, № 2. С. 3 - 12.
6. Шакирьянов М.М. Пространственные хаотические колебания трубопровода в сплошной среде под действием переменного внутреннего давления // Известия Уфимского научного центра РАН. 2016. № 4. С. 35 – 47.
7. Li - Qun Chen, Guo – Ce Zhang, Hu Ding. Internal resonance in forced vibration of coupled cantilevers subjected to magnetic interaction. // J. of Sound and Vibration. 2015. Vol. 354. P. 196 – 218.

# РЕЛАКСАЦИЯ СТРУКТУРЫ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОКО НИКЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Самигуллина А.А.<sup>1</sup>, Шаяхметова Э.Р.<sup>2</sup>, Жиляев А.П.<sup>1</sup>, Назаров А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа  
asiya\_nazarova@mail.ru

## *Введение*

Использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД) металлических материалов открывает множество новых возможностей для эксплуатации их уникальных свойств – высокой прочности, твердости и т.д. [1,2]. Вместе с тем пластичность материалов, подвергнутых ИПД, нередко значительно снижается за счет высоких внутренних напряжений, создаваемых неравновесными границами зерен [2]. Пост-деформационный отжиг не всегда позволяет достичь необходимого улучшения свойств, и возникает необходимость использования иных физических методов релаксации структуры. Один из таких методов, изучаемых в настоящее время – это ультразвуковая обработка (УЗО).

В работе [3] было показано, что УЗО приводит к значительному снижению внутренних напряжений в ультрамелкозернистом (УМЗ) никеле, а также к повышению термической стабильности его структуры. Эффект релаксации структуры зависит от амплитуды осциллирующих напряжений. Зависимость механических свойств от амплитуды УЗО изучалась в работе [4], где было обнаружено существование амплитуды, при которой все свойства достигают максимума и выше которой проявляется обратный эффект.

В настоящей работе исследуется влияние амплитуды УЗО на микроструктуру, величины микронапряжений и микротвердости УМЗ никеля, полученного ИПД кручением.

## *Материалы и методика исследования*

Образцы технически чистого никеля (99,5%) марки НП2 толщиной 1,2 мм и диаметром 12 мм были подвергнуты кручению под квазигидростатическим давлением (КГД) 6 ГПа на наковальнях Бриджмена с «канавками» глубиной по 0,25 мм при комнатной температуре. В результате были получены диски толщиной 0,5 мм и диаметром 12 мм. Часть образцов подвергалась УЗО по схеме, описанной в [5]. Амплитуда внешних осциллирующих напряжений составляла 20, 40 и 60 МПа.

Микроструктура образцов была исследована методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Фольги для исследований готовили на приборе для струйной полировки TenuPol.

Съемку рентгеновского спектра образцов осуществляли на дифрактометре ДРОН-4 с шагом по углу  $2\theta$   $0.1^\circ$  и с временем экспозиции 5 с. Использовалось излучение  $K_\alpha$ -серии, материал анода – медь. Обработку данных и расчет погрешностей проводили с помощью программного пакета Maud (Materials Analysis Using Difraction). Алгоритм программы использует метод Ритфельда, называемый в русскоязычной литературе порошковым полнопрофильным методом.

Микротвердость по Виккерсу измерялась на установке Axiovert 100A с приставкой МНТ-10 при нагрузке индентора 100 г и времени выдержки 10 с.

## *Результаты эксперимента*

На рис. 1а представлен график зависимости микротвердости образцов УМЗ никеля от амплитуды УЗО (состояние с нулевой амплитудой соответствует образцу после кручения). Из рисунка видно, что вначале увеличение амплитуды ультразвука приводит к снижению микротвердости, и при амплитуде 40 МПа она достигает минимума. При дальнейшем увеличении амплитуды УЗО до 60 МПа значение микротвердости снова увеличивается.

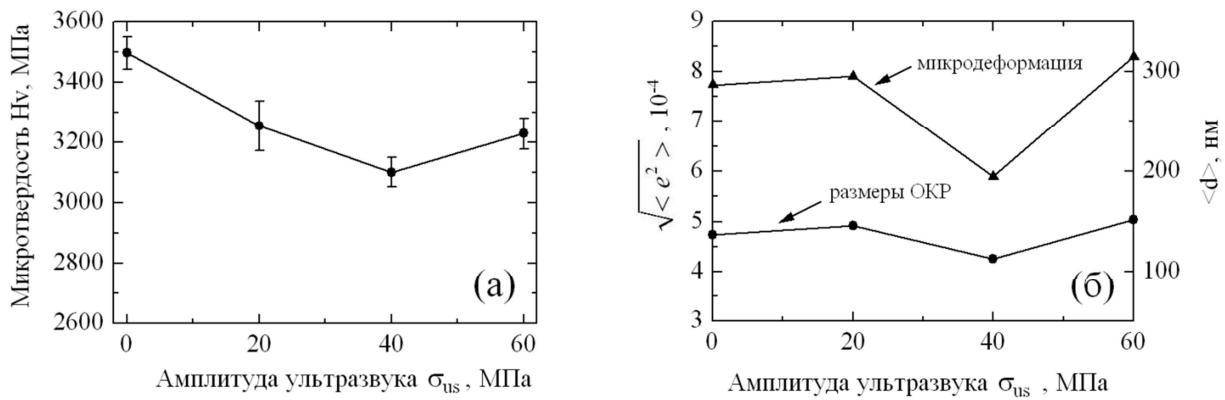


Рис. 1. Зависимость микротвердости (а), среднеквадратической микродеформации и размеров ОКР (б) образцов никеля, подвергнутых КГД, от амплитуды УЗО

На графиках зависимости среднеквадратической микродеформации и размеров ОКР, рассчитанных по данным РСА, от амплитуды УЗО (рис. 1б) видно, что наименьшее значение микродеформации, так же как и микротвердости, достигается в состоянии после УЗО с амплитудой 40 МПа. Аналогично микротвердости, при дальнейшем увеличении амплитуды ультразвука значение микродеформации увеличивается. При этом размеры ОКР значительно не меняются.

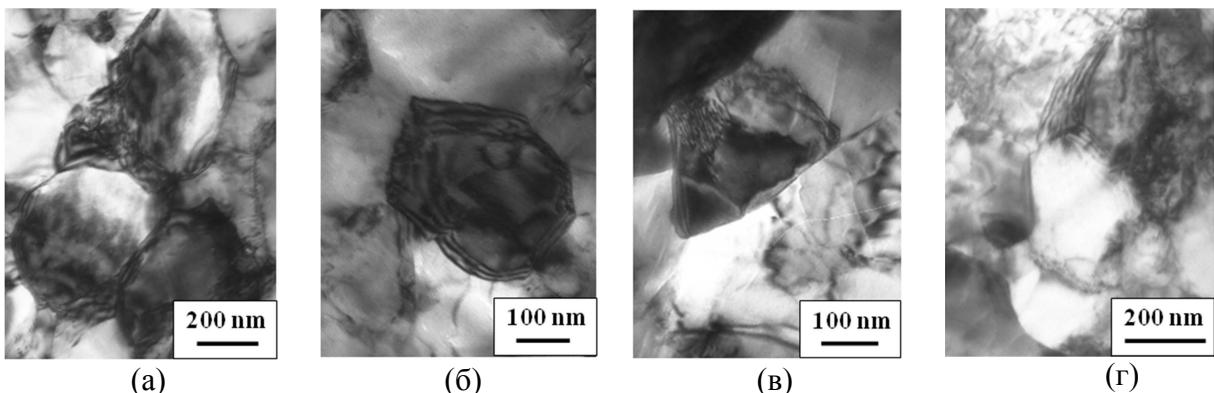


Рис. 2. Микроструктура образцов никеля, подвергнутых КГД (а) и УЗО с амплитудами 20 (б), 40 (в) и 60 МПа (г)

На рис. 2 представлены характерные участки изображений структуры, полученных просвечивающим электронным микроскопом. В исходном состоянии (рис. 3а) наблюдаются типичные для УМЗ материалов сложный диффузный контраст внутри зерен и неровные границы зерен, что свидетельствует о неравновесности структуры границ. Размер зерен, приблизительно оцененный по электронно-микроскопическим снимкам, во всех состояниях составляет около 400 нм. В состояниях после УЗО с амплитудами 20 и 40 МПа границы зерен выглядят более четкими и ровными, чем в исходном деформированном состоянии и после УЗО с амплитудой 60 МПа.

Представленные данные качественно совпадают с результатами, полученными ранее на тонких образцах никеля с УМЗ структурой, полученной кручением под высоким давлением в оснастке без канавок [5]. Имеется количественная разница в амплитуде УЗО, при которой среднеквадратическая микродеформация и значения микротвердости достигают минимума (60 МПа для тонких образцов и 40 МПа для исследованных в данной работе). Очевидно, количественный эффект УЗО может зависеть от толщины образцов после КГД, а также размера зерен.

## *Выводы*

Эффект релаксации структуры УМЗ никеля под действием УЗО возникает при определенной амплитуде, выше которой процессы генерации и накопления дефектов преобладают над процессами возврата, что приводит к росту внутренних напряжений и микротвердости. Для каждого материала и вида образцов, по-видимому, существует своя амплитуда УЗО, при которой эффект релаксации максимален. Для понимания зависимости этой характерной амплитуды от параметров исходного материала требуются дальнейшие исследования.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 16-19-10126).

## *Литература*

1. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured materials. In: Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology, Ed. W. Goddard, D. Brenner, S. Lyshevski, G. Iafrate, CRC Press. 2003. P. 22-1-22-41.
2. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. Hoboken, Wiley. (2013) 440 p.
3. Назарова А.А., Мулюков Р.Р., Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Назаров А.А. Влияние ультразвуковых колебаний на структуру и свойства ультрамелкозернистого никеля // ФММ. 2010. Т. 110. № 6. С. 600-607.
4. Samigullina A.A., Nazarov A.A., Mulyukov R.R., Tsarenko Yu.V., Rubanik V.V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing // Rev.Adv.Mater.Sci. 2014. No ½. Vol. 39. P. 48-53.
5. Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Сергеев С.Н., Жиляев А.П., Назаров А.А., Загидуллина Ю.Р., Пархимович Н.Ю., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и микротвердость ультрамелкозернистого никеля, полученного методом кручения под высоким давлением // Письма о материалах. 2017. Т. 7. вып. 2. С. 85-90.

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА СИЛУМИНОВ И СУСПЕНЗИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Косников Г.А.<sup>1</sup>, Эльдарханов А.С.<sup>2</sup>, Калмыков А.В.<sup>1</sup>, Беспалов Э.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, <sup>2</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет им. ак. М.Д. Миллионщикова.  
chief@nomit.ru

Технология и механизмы влияния ультразвуковой обработки (УЗО) расплавов в жидким и двухфазном состояниях на структуру алюминиевых сплавов являются предметом многочисленных публикаций зарубежных и отечественных авторов. Обнаружено положительное влияние УЗО на измельчение эвтектических фаз в доэвтектических, эвтектических и заэвтектических силуминах [1], вырождение дендритов твердого раствора и формирование тиксотропной структуры [2], снижение содержания водорода и газовой пористости [3], отмечается положительный эффект перемешивания расплава и замешивания дисперсных частиц при получении алюроматричных композитов [4-5]. Установлено и зафиксировано в виде открытия, что при сочетании ультразвуковой обработки в режиме кавитации с введением модификаторов зародышевого типа в отливке формируется структура субдендритного типа (недендритная структура) [6]. При этом используются установки, различающиеся по мощности, частоте колебаний, конструкции, размерам и материалу излучателей, различные температурные интервалы и длительности УЗО, различные по емкости и форме сосуды с расплавом, различные способы введения ультразвука в расплав.

При получении алюроматричных композиционных материалов с использованием жидкокапельных технологий возникает целый ряд проблем, связанных с введением в расплав дисперсных частиц, обеспечением их равномерного распределения в объеме расплава и сохранением достаточной седиментационной устойчивости суспензии на всех этапах получения литой заготовки. Благодаря специфичности механизмов воздействия на жидкие среды вообще и металлические расплавы в частности (кавитация, акустические потоки и проч. [7]) УЗО является перспективным, в то же время недостаточно исследованным, методом воздействия на структуру и свойства алюроматричных дисперсно-упрочняемых композиционных сплавов.

Несмотря на многообразие марок и составов исследуемых алюминиевых сплавов, наиболее широкими объектами исследования влияния УЗО являются силумины, а наиболее часто используются сплавы A356 и A357 [2] и их ближайший аналог - отечественный сплав АК7. Эти же сплавы используются при исследовании процессов тиксоформовки [8] и формирования алюроматричных композитов [4-5].

Учитывая повышение седиментационной устойчивости металлических суспензий при понижении вязкости расплавов, существенное влияние процессов, происходящих в двухфазной зоне, на структуру и свойства композитов, перспективность использования тиксотехнологий для получения изделий из композитов, актуальной является задача исследование влияния УЗО на формирование структуры доэвтектических силуминов и композитов на их основе.

Целью экспериментов [9] являлось исследование влияния УЗО на дендритную структуру твердого раствора сплава АК7Ч при его охлаждении из жидкого до жидкок-тврдого состояния, изменении температурных интервалов и длительности воздействия. Использовались три ультразвуковые установки: 1 - генератор УЗГ 3-4М мощностью 4кВт, магнитострикционный преобразователь ПМС-15А/18; 2 - генератор УЗГ 17-2,0/22 мощностью 2кВт, магнитострикционный преобразователь ПМС-2,0/22; 3 - генератор мощностью 150 Вт, пьезокерамический преобразователь УЗИ138.

Сплав АК7Ч заливался в графито-шамотный или стальной тигли. Образцы для изготовления металлографических шлифов получали за счет всасывания расплава в кварцевую трубку с внутренним диаметром 16 мм и закалки в воду.

Условия проведения экспериментов, результаты влияния УЗО на степень вырождения дендритной структуры сплава АК7ч (площадь вырожденных дендритов  $D_{в.д.}$ , %), полученные при проведении экспериментов 1-4, представлены на рис.1,2.

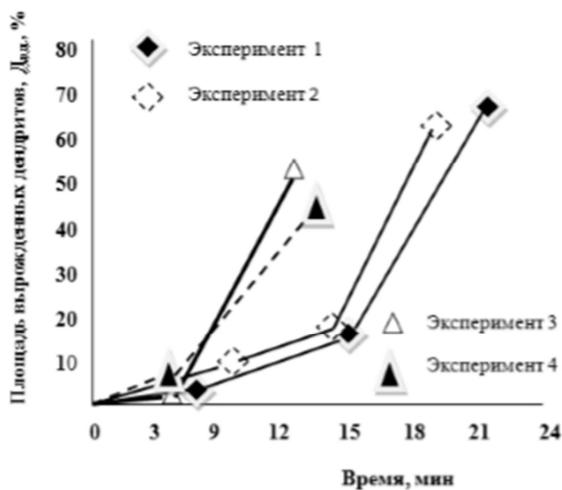


Рис. 1. Влияние УЗО на степень вырождения дендритной структуры твердого раствора сплава АК7

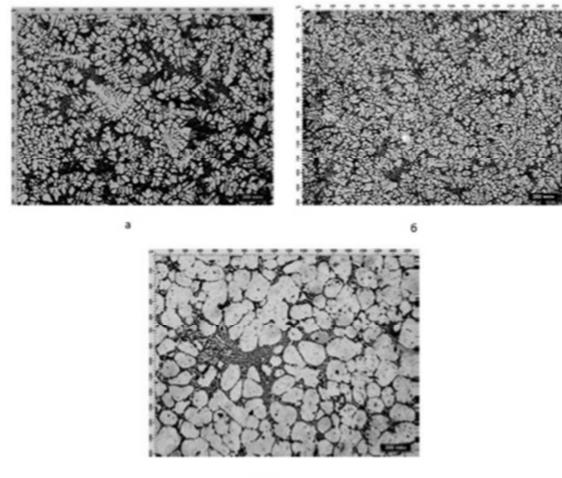


Рис. 2. Влияние УЗО на дендритную структуру сплава АК7 в эксперименте №1:  
а - исходное состояние; б - УЗО в течение 6 мин в интервале 607 – 600°C; в – УЗО в течение 6 мин при 600°C (x20), травлено

По результатам экспериментов сделаны следующие основные выводы:

- влияние УЗО на дендритную структуру сплава АК7ч проявляется наиболее эффективно при обработке расплава в области жидкотвердого состояния;
- эффективность УЗО снижается при уменьшении электрической мощности установки и, как следствие, уменьшении мощности, вводимой в расплав;
- при использовании установки малой мощности с пьезокерамическим преобразователем эффективность влияния на вырождение дендритной структуры проявляется слабее, чем при использовании установок с магнитострикционным преобразователем мощностью от 2 до 4 кВт;
- при сравнении различных методов подвода УЗ в расплав более эффективным является подвод непосредственно в расплав.

Исследовалось влияние УЗО на поведение дисперсных частиц в жидких средах<sup>1</sup>. Использовалась установка в составе УЗГ 17-2,0/22 и ПМС-2,0/22, титановый излучатель погружался непосредственно в расплав. В качестве модельных жидкостей использовались вода и парафино-стеариновая смесь (ПСС, температура плавления 52°C, белый цвет в затвердевшем состоянии). В качестве дисперсных частиц с преобладающим размером 3...5 мкм применялись карбид бора, карбид кремния и оксид никеля, которые имеют различную плотность и, благодаря темному цвету, хорошо видны в модельных жидкостях и алюминиевых сплавах. Фиксация положения частиц после УЗО обеспечивалась путем отбора проб с помощью всасывания расплава в медную (ПСС) или кварцевую (сплав АК7ч) трубки с последующей закалкой в воду. Суспензия на основе ПСС намораживалась также на погружающую и быстро извлекаемую из расплава кварцевую пластинку, что позволяло оценивать равномерность распределения дисперсных частиц по цвету пробы.

Зона кавитации фиксировалась с помощью лазерного дальномера и по нарушению сплошности (пробою) фольги, обернутой вокруг излучателя и закрывающей его торец. Было установлено, что шероховатость торцевой поверхности излучателя, появляющаяся в результате кавитации, приводит к смещению кавитационной зоны, изменению характера разрушения фольги. Симметричность зоны восстанавливалась после шлифовки торца излучателя.

<sup>1</sup> В работе участвовала О.Е. Серикова

Излучающими поверхностями являлись не только торец излучателя, но и его цилиндрическая часть, погруженная в воду.

Для оценки поведения дисперсных частиц в модельных жидкостях частицы карбида кремния помещали на дно стеклянного сосуда с водой. После УЗО в течение 5...10 с наблюдалось вовлечение в хаотическое движение всех введенных частиц. Повторение эксперимента с использованием ПСС, нагретой до 75<sup>0</sup>С, и оксида никеля позволило обеспечить равномерное распределение дисперсных частиц после УЗО в аналогичных условиях.

Приготовление расплава АК7ч осуществлялось в трубчатой индукционной печи мощностью 4 кВт в среде аргона в графито-шамотном тигле. После погружения излучателя в расплав на 10 мм и УЗО в течение 2,5 мин отбиралась пробы с помощью кварцевых трубок в различных зонах тигля с расплавом, структура фиксировалась за счет закалки образцов диаметром 16 мм в воду. Из литьих заготовок изготавливались шлифы, количественный металлографический анализ осуществлялся на оптическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-4 с программным обеспечением ImageExpertPro3.7.

Статистическая обработка результатов металлографического анализа подтвердила возможность использования УЗО для замешивания и равномерного распределения дисперсных частиц в алюминиевых сплавах.

#### Литература

1. L. Zhang, D.G. Eskin, A. Miroux and L. Katgerman. Formation of Micro-Structure in Al-Si Alloys under Ultrasonic Melt Treatment //Light Metals 2012 Edited by: Carlos E. Suarez TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2012. pp. 99-104.
2. S. Jia, L. Nastac. The Influence of Ultrasonic Stirring on the Solidification Microstructure and Mechanical Properties of A356 Alloy S. // Chemical and Materials Engineering 1(3), 2013. pp. 69-73.
3. Noé Alba-Baena1, Dmitry Eskin. Kinetics of Ultrasonic Degassing of Aluminum Alloys //Light Metals 2013 Edited by: Barry Sadler TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2013.
4. Косников Г.А., Баранов В.А., Петрович С.Ю., Калмыков А.В. Литейные наноструктурные композиционные сплавы //Литейное производство. - №2. - 2012. - с.4-9.
5. G.A. Kosnikov, O.L. Figovsky, A.S. Eldarkhanov. Production technologies of metal matrix composites (Review) //Journal "Scientific Israel-Technology Advantages", vol. 16, №.2, 2014. pp. 215 - 221.
6. Добаткин В.И., Белов А.Ф., Эскин Г.И., Боровикова С. И., Гольдер Ю.Г. Закономерность кристаллизации металлических материалов. Научное открытие. Диплом № 271, Открытия, Изобретения. 1983. № 37. С. 1.
7. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. М: «Новые технологии», 2004, 784 с.
8. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердо-жидком состоянии. Новые промышленные технологии. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 223 с.
9. Г.А. Косников, А.С. Эльдарханов, В.В. Сербин, А.В. Калмыков. Влияние ультразвука на дендритную структуру сплава АК7 при его подготовке к тиксолитию //Цветные металлы.- № 3.-2016.- с. 73-78.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛОКОН И МАТРИЦЫ В ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Белоусов Н.Н., Варюхин В.Н.

ДонФТИ им. А. А. Галкина, г. Донецк  
bilniknik52@gmail.com

Понимание механизмов взаимодействия армирующих волокон и матрицы в волокнистых композиционных материалах (ВКМ) на различных этапах деформационного структурообразования, является одной из актуальных задач получения ВКМ с заданными свойствами на основе усовершенствования технологии пакетной гидроэкструзии.

*Материал и методы эксперимента.* Основным материалом исследования выбран ВКМ Cu-Fe, полученный методом пакетной гидроэкструзии с различной степенью армирования: (211)<sup>1</sup>, (211)<sup>2</sup> и (211)<sup>3</sup>. Исследования проведены на многофункциональной ультразвуковой установке. Ультразвуковая установка собрана по схеме усилителя с положительной обратной связью и регулируемой частотной полосой. Резонансными элементами установки являлись: кварцевые резонаторы ( $f_p = 60, 100$  кГц, метод трехсоставного пьезовибратора); пьезокерамика из титаната бария ( $f_p = 10, 30$  МГц, эхо-импульсный метод); ЦТС-керамика ( $f_r = 22, 44$  кГц, метод вибратора с удлиненным концентратором). В зависимости от используемых пьезопреобразователей, диапазона частот и амплитуд деформаций в установке предусмотрены два режима работы: автогенератора и внешнего возбуждения.

При работе в режиме автогенератора предусмотрено, что выходное напряжение  $U_R$  с сопротивления  $R$  усиливалось и поступало на вход нуль-индикатора переменного тока (типа Ф582). Нуль-индикатор использовался как высокочувствительный избирательный усилитель-ограничитель, на выходе которого получался синусоидальный сигнал постоянной амплитуды. Для настройки акустической системы в резонанс, предусмотрена плавная регулировки сдвига фаз между сигналами  $U_R$  и  $U$ . Далее сигнал, усиленный выходным усилителем, снабженным верньерным механизмом для плавной регулировки усиления, через аттенюатор подавался на пьезопреобразователь. Аттенюатор D3-4 обеспечивал общее ослабление выходного сигнала до 100 дБ (ступенями через 10 дБ). Амплитуда возбуждающего напряжения в диапазоне от 1 до  $10^3$  В измерялась вольтметром ВК7-9, частота - электронносчетным частотомером ЧЗ-35А.

Для работы в режиме внешнего возбуждения разрывалась цепь положительной обратной связи и к входу Ф582 подключались делитель частоты и генератор внешнего запуска ГЗ-112. Генератор запускался в режиме возбуждения П-образных импульсов с плавной регулировкой частоты. Амплитуда относительной деформации образца поддерживалась постоянной и пропорциональной выходному напряжению  $U_R$  в процессе всего эксперимента. Это обеспечивалось дополнительной обратной связью, позволяющей использовать сигнал  $U_R$  для управления возбуждающим напряжением. Выходное напряжение поступало на вход усилителя переменного тока, затем сигнал выпрямлялся и подавался на схему сравнения. Величина сигнала  $\Delta U$  увеличивалась усилителем постоянного тока и направлялась на скользящий контакт делителя напряжения (через обмотку сервопривода электродвигателя РД-9).

*Экспериментальные возможности и режимы работы установки.* В зависимости от используемой величины возбуждающего напряжения в установке предусмотрена работа в двух режимах: амплитудно-независимого (АнЗВТ) и амплитудно-зависимого внутреннего трения (АЗВТ). В случае АнЗВТ при постоянном напряжении  $U_R$  логарифмический декремент колебаний  $\delta$  пьезодатчика был пропорционален величине возбуждающего напряжения  $U$ . Путем непрерывной регистрации изменения  $\Delta U$  в зависимости от температуры или деформации, получали информацию (в режиме *in situ*) о температурной или деформационной зависимостях внутреннего трения исследуемого материала. Чувствительность установки к относительным изменениям внутреннего трения достаточно высока ( $\Delta U/U \sim 10^{-4}$ ) и равна отношению чувствительности усилителя следящей системы ( $\Delta U \leq 10$  мкВ) к величине

опорного напряжения ( $U \geq 10$  В). Пределы изменения амплитуды колебательной деформации  $\varepsilon \sim 10^{-6} - 10^{-3}$  в диапазоне рабочих частот  $f \sim 0.02 - 30$  МГц. Определены относительные погрешности измеряемых параметров, в частности: резонансной частоты пьезопреобразователей с учетом влияния закрепления ( $\Delta f/f_0 \sim 5 \cdot 10^{-4}$ ), собственной частоты образца с учетом отклонения от расчетных геометрических размеров ( $\Delta f/f_{обр} \sim 10^{-3}$ ) и модуля упругости ( $\Delta E/E_o \sim 5 \cdot 10^{-3}$ ).

*Определение упругих и неупругих характеристик материала.* Для измерения декремента колебаний ( $\delta$ ) или величины внутреннего трения ( $\delta = \pi \cdot \mathcal{F}^l$ ) применяли метод измерения резонансного значения активной составляющей ( $R_n$ ) эквивалентного входного электросопротивления акустической системы, поскольку  $\delta \sim R_n$ . Зная резонансную частоту акустической системы определяли динамический модуль Юнга ( $E$ ) исследуемого материала, который пропорционален частоте ( $E \sim f^l$ ). Зная величину возбуждающего напряжения ( $U_d$ ) на приемном пьезопреобразователе и напряжение ( $U_g$ ) на приемном датчике в момент резонанса, определяли логарифмический декремент упругих колебаний ( $\delta_n = k_\delta U_d/U_g$ ) акустической системы, амплитуду колебательной деформации ( $\varepsilon_0 = k_\varepsilon U_g$ ,  $k_\varepsilon = 0.2 \cdot 10^{-5}$ ) и деформирующее напряжение ( $\sigma = \varepsilon_0 E$ ). Экспериментально определено, что изменение напряжения на приемном датчике  $U_g \approx 1$  мВ соответствовало деформации  $\varepsilon_0 \approx 2 \cdot 10^{-6}$ .

При исследовании высокодемпфированных или прошедших ИПД-обработку материалов последовательно к пьезоэлементам подключалось дополнительное сопротивление ( $R$ ) и применялся метод комплексного измерения резонансной ( $f_r$ ) и антрезонансной ( $f_a$ ) частот пьезовибратора при одновременной регистрации падения напряжения на резонансе ( $U_r$ ) и антрезонансе ( $U_a$ ). В этом случае дополнительно использовали амплитудно-частотный характеристограф АЧХ Х1-19 и синтезатор частот ЧЗ-33. Логарифмический декремент колебаний и частоту определяли по известным формулам.

Кроме метода резонанс-антрезонанс применяли метод измерения ширины резонансного пика. Этот метод, в основном, использовался при небольших амплитудах колебательной деформации (область АИЗВТ) нами предусмотрена техническая возможность его применения в области АЗВТ. Для этого установка дополнительно комплектовалась генератором качающей частоты анализатора спектра СК4-59 и широкополосным усилителем мощности УЗ-32. Сканирующий сигнал с плавающей частотой в диапазоне  $\Delta f \sim 0.2 - 1.5$  МГц от анализатора спектра подавался на широкополосный усилитель. После усиления сигнал поступал на возбуждающий пьезодатчик, закрепленный на верхней плоскости образца. Возбуждаемые в образце колебания воспринимались приемным пьезовибратором, укрепленным на нижней плоскости образца. Пьезоэлектрические характеристики этого датчика максимально соответствовали параметрам возбуждающего датчика. Сигнал усиливался и подавался на вход анализатора спектра СК4-59 где исследовались резонансные кривые. Получали зависимость амплитуды электрического сигнала ( $U$ ) от частоты ( $f$ ). По графику зависимости  $U = \varphi(f)$  определяли максимальное значение амплитуды ( $U_{рез}$ ) и резонансную частоту ( $f_0$ ). После этого находили ширину резонансного пика ( $\Delta f$ ) на высоте  $0.707 \cdot U_{рез}$  (т.е.  $\Delta f_{0.7}$ ) и по формуле  $\delta = \pi \cdot \mathcal{F}^l = \Delta f_{0.7}/f_0$  определяли декремент колебаний и величину внутреннего трения.

*Автоматизация УЗ установки.* Автоматическая запись результатов экспериментов осуществлялась следующим образом. Возбуждающее напряжение через преобразователь напряжения подавалось на вход у двухкоординатного самописца Н307/2, а на вход  $x$  - ЭДС термопары (при температурных измерениях) или постоянное напряжение ( $U_m$ ) с тензодатчиков (при деформационных измерениях). Непрерывная регистрация резонансной частоты вибратора в процессе изменения температуры или деформирующего напряжения осуществлялась с помощью второго самописца Н307/2. Постоянное напряжение, пропорциональное частоте пьезопреобразователя, подавалось на вход у самописца, на вход  $x$  - напряжение, пропорциональное температуре или нагрузке, прикладываемой к образцу.

*Компьютеризация ультразвуковой установки.* Управление экспериментом осуществлялось с помощью специально разработанной программы RTViewer3\_V2.

Выделенный акустический сигнал через согласующий усилитель подавался на аналогово-цифровой преобразователь ADA 1406. С помощью АЦП сигнал записывался по четырем дифференциальным каналам с частотой опроса 85 кГц и затем поступал на персональный компьютер. Программирование осуществляли в среде пакета LabVIEW Workbench, применяемого для разработки лабораторных виртуальных приборов. Обработку экспериментальных данных проводили в программных пакетах PowerGraph-3.3 и Origin-7.

*Результаты эксперимента и их обсуждение.* Образцы и УЗ-датчики закреплялись на цанговых зажимах деформационной машины 2165Р-50. Анализ экспериментальных зависимостей декремента колебаний и дефекта модуля в процессе высокотемпературной ползучести Cu-Fe (211)<sup>1</sup> композита показал, что демпфирующие свойства ВКМ обусловлены, в основном, суперпозицией релаксационных процессов, протекающих в высокопрочных волокнах Fe и в менее прочной матрице Cu.

Обнаружен вклад некогерентных границ раздела ВКМ в неупругое затухание УЗ-колебаний. Этот вклад становился значительным для Cu-Fe (211)<sup>3</sup> при достаточно высоких температурах, когда начинали развиваться диффузионные процессы по межфазным границам, вероятно, вследствие различия в модулях упругости материалов матрицы и волокон.

Показано, что, если на кривой  $\delta(T)$  композита Cu-Fe (211)<sup>2</sup> в области низких температур ( $T \leq 400^{\circ}\text{C}$ ) наблюдался максимум, то при переходе от первой стадии ползучести к установившейся начиналось разрушение на границах раздела фаз. Металлографически обнаружено, что при  $T \leq 400^{\circ}\text{C}$  в областях между матрицей и волокнами начинали образовываться поры и микротрещины. Если максимум на кривой  $\delta(T)$  отсутствовал (область высоких температур  $T \geq 600^{\circ}\text{C}$ ), то преимущественное зарождение трещин происходило в матрице Cu, поскольку области возле волокон Fe были упрочнены интерметалличидными включениями. Такое поведение  $\delta(T)$  объяснялось тем, что в более мягкой матрице Cu начинались процессы микропластической деформации при сохранении упругости более прочных волокон Fe. Специфические амплитудно-частотные характеристики сигналов акустической эмиссии, генерируемые дефектами структуры, идентифицировались на фоне других источников акустического излучения, определялись моменты их появления и характерные времена эволюции, оценивались направление и скорость распространения по образцу и др.

Показана возможность использования бесконтактной *in situ* диагностики и прогнозирования состояния Cu-Fe (211)<sup>2</sup> в процессе испытания в условиях активного растяжения, релаксации напряжений, ползучести, малоцикловой усталости и пр.

Были проведены дополнительные эксперименты, которые обнаружили, что:

1) увеличение амплитуды сдвиговой деформации в пределах  $\varepsilon_{\text{де}} = 10^{-5} \div 10^{-4}$  при постоянной скорости растяжения  $\Delta\varepsilon/\Delta t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  (в области упругой деформации) сопровождалось уменьшением величины затухания;

2) при увеличении скорости активной деформации ( $\Delta\varepsilon/\Delta t = 10^{-6} \div 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ) величина затухания значительно возрасала, и начало амплитудной зависимости декремента колебаний смешалось в сторону малых амплитуд;

3) при постоянной скорости деформации  $\Delta\varepsilon/\Delta t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  затухание увеличивалось с увеличением частоты колебаний;

4) при увеличении скорости активной деформации  $\varepsilon$  с  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  декремент колебаний увеличивался с  $\delta_1 = 2 \cdot 10^{-3}$  до  $\delta_2 = 4 \cdot 10^{-2}$ ;

5) при изменении частоты с  $f_1 = 60 \text{ кГц}$  до  $f_2 = 120 \text{ кГц}$  декремент колебаний увеличился с  $\delta_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  до  $\delta_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ .

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Белоусов Н.Н., Варюхин В. Н.

ДонФТИ им. А. А. Галкина, г. Донецк  
bilniknik52@gmail.com

Проведены *in situ* исследования с комплексным использованием методов акустической эмиссии и ультразвуковой спектроскопии для изучения механизмов взаимодействия армирующих микроволокон и матрицы в волокнистых композиционных материалах (ВКМ) на различных этапах макро- и микропластической деформации.

*Материал и методы эксперимента.* Материал исследования ВКМ Cu-NbTi (различной степени армирования: (211)<sup>1</sup>, (211)<sup>2</sup> и (211)<sup>3</sup>), полученный методом пакетной гидроэкструзии. Деформация растяжением ВКМ осуществлялась на деформационной машине 2167Р-50. При деформации растяжением в качестве индикатора начала деформационного структуро- и дефектообразования использовались методы ультразвуковой спектроскопии и акустической эмиссии (АЭ). В методе АЭ к торцевой и продольной сторонам образцов специальным образом прикреплялись стандартные пьезоэлектрические датчики, вырезанные из керамики ЦТС-19 и монокристаллов LiNbO<sub>3</sub> (Y = 35 град), перекрывающие широкий диапазон частот (от 20 кГц до 10 МГц). Аналоговые сигналы АЭ наблюдались и анализировались с помощью запоминающего осциллографа. Цифровые АЭ-сигналы записывались в память персонального компьютера с помощью специального АЦП через USB порт.

На рис. 1 представлен усовершенствованный узел крепления образца и датчиков АЭ на машине 2167Р-50.

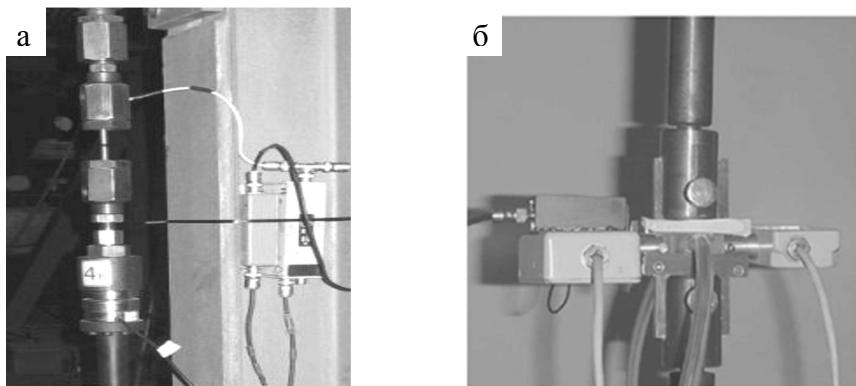


Рис. 1. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) крепления датчиков АЭ на узлах деформационной машины 2167Р – 50

*Основные блоки усовершенствованной АЭ-установки.* Для исследования ВКМ в процессе деформационного структуро- и дефектообразования была усовершенствована АЭ-установка. Для определения характера источников акустической эмиссии и типа дефектов использовался метод имитации сигналов АЭ с помощью запоминающего осциллографа С8-23. В качестве имитатора сигналов акустической эмиссии использовался пьезоэлектрический преобразователь, возбуждаемый электрическими импульсами от стандартного УЗ-генератора (типа Г3-54). При этом частотный диапазон имитационного импульса строго соответствовал частотному диапазону исследуемых АЭ-сигналов. Для имитации АЭ-сигналов, возникающих при зарождении и распространении трещин, использовали метод динамического излома Су-Нильсена. Для этого применяли графитовые стержни различных диаметров ( $d = 3 \div 8$  мм). Усовершенствованная АЭ-установка состоит из следующих блоков: амплитудно – частотного

анализатора спектра, дифференциального амплитудного дискриминатора с автоматическим переключением порога дискриминации, электронного прибора, позволяющего регистрировать порог дискриминации и соответствующее ему количество импульсов в течении заданного времени экспозиции.

*Компьютеризация АЭ-установки.* В процессе экспериментов на растяжение отдельные сигналы с АЭ-датчиков, поступали на вход предварительного усилителя. С выхода предусилителя сигналы фильтровались, затем поступали на вход основного усилителя. Регулировка коэффициента усиления, необходимая для адаптации входного сигнала к шкале АЦП, осуществлялась аттенюатором. Далее аналоговый сигнал преобразовывался с помощью АЦП в цифровой формат, и цифровой поток данных поступал на блок формирования параметров. Сигналом к запуску этого блока служило превышение сигналом АЭ порога дискриминации. Этот порог устанавливался во время эксперимента индивидуально для каждого измерительного канала. Управление АЦП осуществлялось с помощью специального программного пакета RTViewer\_V-4. Программный пакет RTViewer\_V-4 в комплекте с платой АЦП позволял записывать АЭ-сигналы по четырем дифференциальным каналам с частотой опроса до 80 кГц. В отдельных случаях предусмотрено применение программного пакета PowerGraph. При работе УЗ-усилителя на частоте 100 кГц уровень шумов не превышал  $10^{-6}$  В. Такая величина шумов была сопоставима с уровнем собственных шумов усилителя.

Математическая обработка АЭ-сигналов осуществлялась в режиме постобработки и позволяла вычислять скорость распространения и затухания выделенных АЭ-сигналов, проводить спектральный анализ формы сигналов, а также осуществлять классификацию источников акустической эмиссии по амплитуде и степени АЭ-активности. Предусмотрена фильтрация сигналов АЭ по различным критериям: по максимальной амплитуде, по времени поступления сигнала, по суммарной энергии сигнала, по длительности сигнала и т. д.

*Экспериментальное исследование ВКМ.* На рис. 2. (а) представлены электронномикроскопические снимки поверхности разрыва гомогенного нановолокнистого композита Cu-NbTi с количеством волокон (211)<sup>3</sup>. Геометрия торцевой поверхности в условиях пакетного прессования представлена на рис. 2 (б). На рис. 2 (в) приведена профилограмма рельефа поверхности разрыва, по которой оценивались характер разрушения, размеры и структурная организация границ раздела между нановолокнами и оболочкой материала.

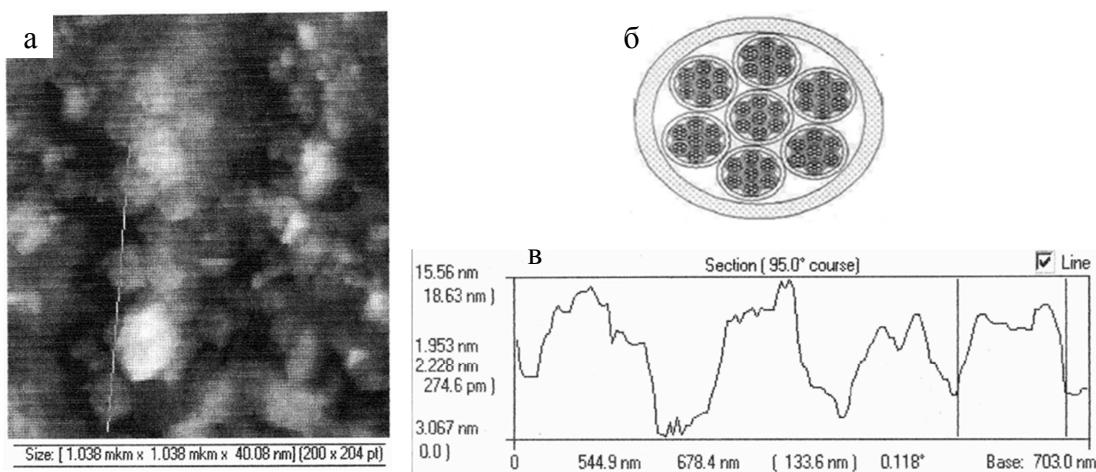


Рис. 2. Электронномикроскопическое исследование нановолокнистого Cu-NbTi композита с участком трассирования электронного луча (а); геометрия торцевой поверхности (б); профилограмма торцевой поверхности разрыва (в).

Профилограмма излома при комнатной температуре испытания (рис.2, в) свидетельствовала о хрупком характере разрушения ВКМ с элементами вязкого течения. Структура ВКМ являлась неоднородной: в одной части образца волокна NbTi ( $d \approx 100$  нм) имели чётко очерченные границы, в другой - волокна теряли свою индивидуальность и,

фактически, сливались с медной матрицей (рис. 2, а). Предварительные исследования микроструктуры исходных образцов Cu-NbTi с (211)<sup>2</sup> показали, что начальные стадии фрагментации и слияния зерен начинали проявляться в условиях динамической рекристаллизации на заключительной стадии процесса пакетной гидроэкструзии. Проведенные деформационно-регистриометрические эксперименты *in situ* в условиях непосредственного разрыва нановолокон свидетельствовали о начале активации деформационно-кинетических процессов.

Одним из актуальных аспектов, связанных с получением и применением ВКМ, являются исследования температурно-временной стабильности наноструктуры. Исследована зависимость предела прочности и пластичности Cu-NbTi с (211)<sup>1</sup> от температуры испытания. Показано, что, начиная с 1000 К, наблюдалось достаточно резкое уменьшение предела прочности (с 940 МПа при 300 К до 660 МПа при 900 К) со значительным увеличением пластичности (с 10% при 300 К до 20 % при 900К). Величина декремента колебаний  $\delta$  в условиях активного растяжения Cu-NbTi в макроупругой области монотонно увеличивалась. Сигналы АЭ находились на уровне фона. В области физического предела текучести наблюдалось значительное повышение  $\delta$  вследствие пластической деформации матрицы и микропластической деформации волокон. Сигналы АЭ активировались в области средних частот. На стадии макропластического течения Cu-NbTi величина  $\delta$  выходила на максимум, при этом начинали регистрироваться отчетливые импульсы АЭ. Регистрируемые импульсы имели крутой передний фронт (около  $10^{-7}$  с) с высокочастотным ( $f_1 \geq 80 \div 220$  кГц) заполнением, переходящим к относительно низкочастотному ( $f_2 \geq 15 \div 30$  кГц) затуханию. Акустический сигнал имел дискретную структуру и представлял собой последовательность отдельных импульсов, временной интервал  $\tau$  между которыми не превышал 1 мкс и зависел от степени деформации и вида нагружения. В зависимости от степени деформации ВКМ Cu-NbTi длительность  $\Delta\tau$  отдельных импульсов изменялась от 1 до 20 мкс, а амплитуда  $I$  - в интервале от 0.1 до 30 мВ. Изменение интенсивности АЭ с увеличением скорости деформации носил сложный характер. В области пластической деформации при скорости деформации  $\Delta\varepsilon/\Delta t \approx 5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> интенсивность АЭ начинала повышаться до  $J = 10^3$  имп/с.

В процессе *in situ* исследования структурно-кинетических процессов в Cu-NbTi с (211)<sup>1</sup>, обнаружена корреляция между видом кривых деформации и характером поведения декремента колебаний, а также между особенностями изменения акустической эмиссии и параметрами дефектной микроструктуры. Наличие данной корреляции позволило качественно судить о характере разрушения и предшествующих микроструктурных изменениях, происходящих в процессе деформации ВКМ Cu-NbTi с (211)<sup>2</sup> с (211)<sup>3</sup>.

Таким образом, проведено исследование структурно-кинетических изменений в волокнистых наноматериалах, полученных в процессе мегапластической деформации. Экспериментально установлено, что в условиях действия сдвиговых напряжений в гомогенных нановолокнистых материалах одновременно протекают два конкурирующих процесса: фрагментация и динамическая рекристаллизация.

Исследована термическая стабильность сформированной нановолокнистой структуры Cu-NbTi. Экспериментально показано, что при повышении температуры в условиях действия предельных напряжений, происходила смена механизмов пластической деформации: от хрупкого разрушения к вязкому разрушению.

Обнаружен температурный эффект повышенной пластичности гомогенных нановолокнистых материалов Cu-NbTi. Показано, что повышенная пластичность может быть обусловлена проскальзыванием между границами нанонитей NbTi и окружающей их материнской оболочкой Си.

# ЛАЗЕРНЫЙ УЛЬТРАЗВУК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЕЙ МЕТАЛЛОВ

Кожушко В.В., Сергиенко В.П.

ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларусь»,  
Гомель, Республика Беларусь  
kozhushko@laser-ultrasound.com

Измерение скорости продольных и сдвиговых импульсов, возбуждённых в результате оптико-акустического преобразования, решает задачу материаловедения по определению упругих модулей. В изотропных материалах справедливы выражения:

$$C_{11} = \rho c_L^2, C_{44} = \rho c_S^2 \quad (1)$$

где  $C_{11}, C_{44}$  модули, связанные с продольной и сдвиговой волной, соответственно,  $\rho$  – плотность,  $c_L, c_S$  – скорость продольной и сдвиговой волн. Анизотропия кристаллитов в поликристаллах предполагает статистическое усреднение по всем возможным пространственным ориентациям зёрен. Для кристаллов кубической симметрии анизотропию свойств можно выразить как  $v = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$ , а в поликристаллах усреднённые значения модулей  $C_{11}^a = C_{11} - 2v/5, C_{44}^a = C_{44} + v/5$ . Выражения справедливы для статистически изотропного материала, состоящего из анизотропных кристаллитов, ориентированных случайным образом при отсутствии текстуры. Зная два модуля, определяют коэффициент Пуассона и модуль Юнга – величины, часто используемые в расчётах.

В результате поглощения наносекундных лазерных импульсов в металлах возбуждаются ультразвуковые импульсы соизмеримой длительности, что существенно расширяет рабочий диапазон частот по сравнению с традиционными пьезоэлектрическими преобразователями и позитивно отражается на точности измерения скорости пробега [1]. В тоже время для решения поставленных задач необходимы методики и средства, обеспечивающие регистрацию упругих импульсов. Особенностью предлагаемого в работе подхода является бесконтактная регистрация ультразвука в широкой полосе частот электромагнитным акустическим (ЭМА) преобразователем, согласно схеме на Рис. 1а. Отметим, что данный подход можно использовать как для измерения скорости объёмных ультразвуковых импульсов [2], так и для измерения скорости поверхностных импульсов – Рэлеевских волн, представляющих собой комбинацию продольных и сдвиговых волн.

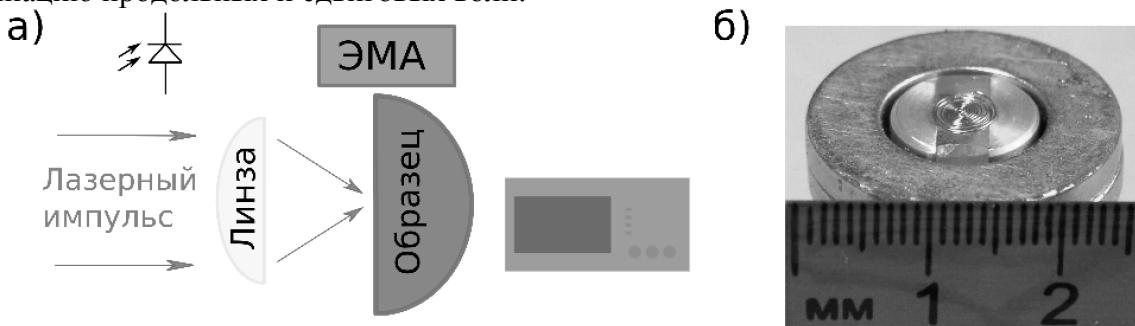


Рис. 1. Схема эксперимента (а), ЭМА-преобразователь (б).

Изготовленный ЭМА-преобразователь в качестве чувствительного элемента использует плоскую катушку диаметром 5 мм из 10 витков медного провода диаметром 0,15 мм [1]. Катушка помещается в центре цилиндрического магнита с внутренним и внешним диаметром 13 мм и 25 мм соответственно, см. Рис. 1б. Постоянное поле NdFeB магнита составляет приблизительно 0,25 Тл. ЭМА-преобразователь чувствителен только к переменному электромагнитному полю, вызванному ультразвуковыми импульсами в металлах через действие силы Лоренца на вихревые токи и/или за счёт воздействия на вектор намагниченности и магнитострикционного эффекта в ферромагнетиках. Катушка включена в цепь предварительного усилителя, изготовленного на чипе AD8099 с минимальной длиной проводников, что требуется для уменьшения паразитных индуктивностей и ёмкостей. Простота изготовления ЭМА-преобразователя делает его применение экономически привлекательным

при решении задач диагностики механических свойств и неразрушающего контроля металлов и композитов на их основе.

Фокусировка оптического излучения цилиндрической линзой локализует положение оптико-акустических источников вдоль оси образующей цилиндрической поверхности, и задача по измерению скорости объёмных ультразвуковых импульсов сводится к определению времени пробега до периферии полудиска. Отметим, что при такой экспериментальной схеме в объёме образца распространяются продольные и сдвиговые, поляризованные в плоскости рисунка импульсы, а по облучаемой поверхности распространяются импульсы Рэлеевских волн. Диаграммы направленности объёмных импульсов различны и зависят от плотности мощности лазерного излучения [3]. Задачей настоящей работы является демонстрация возможности регистрации поверхностных импульсов, при расположении ЭМА-преобразователя в крайнем положении согласно Рис.1а. В поликристаллических металлах рассеяние и затухание ультразвука существенно уменьшают высокочастотную часть спектра импульсов и, как результат, снижает полный размах амплитуды сигналов. Рассеяние проявляется в преобразовании исходных импульсов в преломленные и отражённые на границах зёрен в сдвиговые и продольные волны, отклонённые от направления распространения падающих волн. Результаты проведённых ранее измерений ультразвуковых импульсов показали, что уменьшение среднего размера зерна в металлах значительно уменьшает рассеяние и сохраняет высокочастотную часть спектра импульсов. Особый интерес представляют металлы, подверженные интенсивной пластической деформации кручения под давлением. В таких образцах можно создать области с различной микроструктурой, что является ценным для проведения сравнительных измерений и перспективным для решения обратной задачи по определению среднего размера зерна по результатам измерения затухания и микроструктурного шума [4].

Известно, что интенсивная пластическая деформация значительно изменяют микроструктуру металлов. В случае деформации кручения под давлением в образцах, имеющих форму дисков, эквивалентная сдвиговая деформация линейно растёт с радиусом согласно выражению:

$$\varepsilon = 2\pi rN / (\sqrt{3}d), \quad (2)$$

здесь  $r$  – радиус диска,  $N$  – количество оборотов,  $d$  – толщина диска. Экспериментально установлено, что увеличение плотности дислокаций приводит к фрагментации зёрен. В результате микроструктура таких образцов градиентно изменяется вдоль радиуса. В нашем случае толщина образца 7 мм, радиус более 15 мм, и количество оборотов под давлением порядка 5 ГПа равное 5, создаёт на периферии эквивалентную сдвиговую деформацию равную 37. Известно, что превышение эквивалентной деформации 8 не ведёт к дальнейшей фрагментации зёрен, средний размер которых составляет приблизительно 200 нм [5]. Таким образом, только вблизи геометрического центра в области, ограниченной радиусом 3 мм, локализована более грубая микроструктура, во всех остальных участках микроструктура субмикронная. Для измерения скорости ультразвуковых импульсов из такого образца никеля электроэррозионным методом врезан полудиск радиусом 10 мм, как показано на Рис. 2.

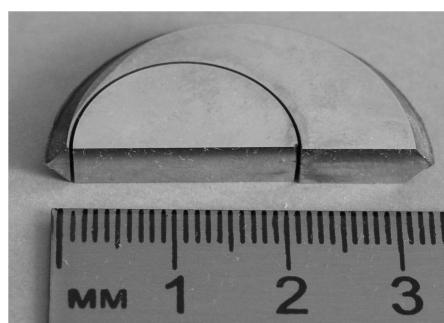


Рис. 2. Никелевый образец в форме полудиска с радиусом 10 мм, вырезанный из половины образца, деформированного кручением под давлением.

Импульсы на длине волны 532 нм длительностью приблизительно 10 нс с частотой повторения 10 Гц излучались лазером LS-2131M-10, производства компании LOTIS Tii. Энергия в импульсе составляла менее 10 мДж. Излучение фокусировалось цилиндрической линзой диаметром 25 мм с фокусным расстоянием 60 мм в отрезок длиной менее 5 мм и шириной менее 0,1 мм вдоль оси, образующей цилиндрическую поверхность. ЭМА-преобразователь располагался на минимально возможном расстоянии от поверхности образца. Электрический сигнал передавался через кабель на вход осциллографа, произведённого компанией UNI-T, UTB-TREND 722-200-7 с аналоговой полосой 200 МГц и частотой дискретизации 1 ГГц. Запуск осциллографа осуществлялся по переднему фронту импульсного сигнала PIN-фотодиода Hamamatsu S5971, фронт сигнала также определял начало отсчёта для времени пробега ультразвуковых импульсов расстояния 10 мм. Доминирующий вклад в сигнал ЭМА-преобразователя связан с магнитострикционным эффектом вблизи поверхности образца никеля. Пример представленного на Рис. 3 сигнала позволяет выделить продольный и Рэлеевский ультразвуковые импульсы, за которыми следует рассеянное ультразвуковое излучение. Ввиду меньших дифракционных потерь полный размах амплитуды поверхностного импульса на порядок больше размаха амплитуды продольного импульса.

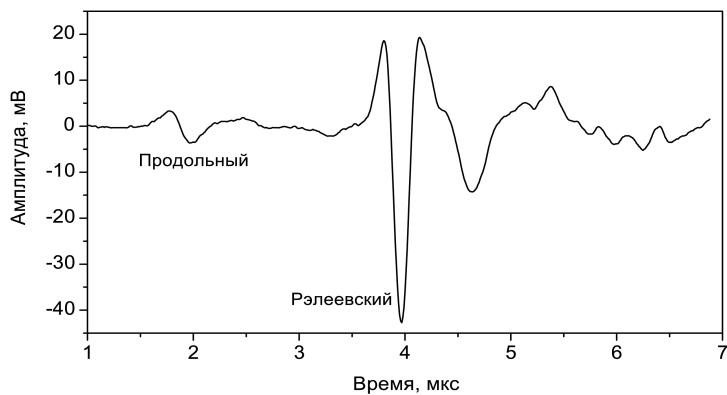


Рис. 3. Пример оптико-акустического сигнала, зарегистрированного в образце никеля.

В заключении отметим, что предложенная бесконтактная методика измерений скорости ультразвуковых импульсов и определения модулей представляется перспективной для решения исследовательских задач диагностики сплавов и металлических композитов. В дальнейших измерениях будет использовано два ЭМА-преобразователя, что решит задачу точного позиционирования оптико-акустических источников на плоской поверхности посредством двухканального измерения и установки одинакового времени прибытия импульсов к противоположным сторонам исследуемого образца.

#### Литература

1. Kozhushko V. V., Krenn H. Detection of laser-induced nanosecond ultrasonic pulses in metals using a pancake coil and a piezoelectric sensor, // T-UFFC IEEE 2012. V. 59. № 6. P. 1233-1238.
2. Кожушко В. В., Сергиенко В.П., Мышковец В. Н. Определение модулей металлических композитов бесконтактной регистрацией оптико-акустических импульсов // Вторая Всероссийская акустическая конференция, Нижний Новгород, 6-9 июня 2017. С. 1850-1855.
3. Kim J., Jhang K.-Y. Non-contact Measurement of elastic modulus by using laser ultrasound // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2015. **16**. №1. P. 905-909.
4. Kozhushko V.V., Paltauf G., Krenn H., Scheriau S., Pippa R., Broadband optoacoustic measurements of ultrasound attenuation in severely plastically deformed nickel // J. Appl. Phys. 2010. V. 107, P. 094905-1-9.
5. Pippa R., Scheriau S., Taylor A., Hafok M., Hohenwarter A., Bachmaier A. Saturation of fragmentation during severe plastic deformation // Annual Review on Materials Research. 2010. V. 40. P.319-343.

# КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ АМД-МЕТОДОВ

Кустов А.И.<sup>1</sup>, Мигель И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный педагогический университет, Россия

<sup>2</sup>ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (Воронеж), Россия  
akvor@yandex.ru

Проблема выявления и характеризации дефектов в материалах конденсированного состояния – одна из наиболее актуальных в современном материаловедении. При этом важна информация не столько о самих дефектах, сколько об их влиянии на свойства материала. Решение этой проблемы эффективно при использовании активно развивающихся в последние десятилетия АМД-методов [1]. Суть их заключается в облучении объекта исследований акустическими волнами (АВ) гигагерцового диапазона, с дальнейшим приемом отраженного сигнала и его анализом. Так как, по сути, дефекты – это неоднородности материала, в области их локализации существует изменение акустического импеданса, которое и выявляется с помощью сканирующего акустического микроскопа (САМ) [2].

Было предложено разработать режимы работы САМ, позволяющие анализировать структуру материала, характеризовать её по акустическим изображениям и с помощью метода V(Z)-кривых [3]. Однородность и изотропность структуры определялась по результатам измерений скоростей ПАВ и коэффициента поглощения АВ в материале, а также по акустическим изображениям, по сигналу строки и проч. Обнаружение и характеризация дефектных областей и их систем были проведены АМД-методами для монокристаллов, стекол, сталей, керамик, чистых металлов. Метод V(Z)-кривых позволил рассчитать значения скоростей акустических волн ( $v_R$ ) с точностью до 0,2%. Деформация металла, возникновение упругих неоднородностей или микротрецин, проявляется в трансформации характерной зависимости выходного сигнала преобразователя  $V$  от расстояния  $Z$  до линзы.

На первом этапе проведены эксперименты на модельных объектах с дефектными структурами, выявленными стандартными методами, или в результате использования взаимодополняющих методик (например, акустомикроскопической визуализации и измерения параметров АВ, рис.1).

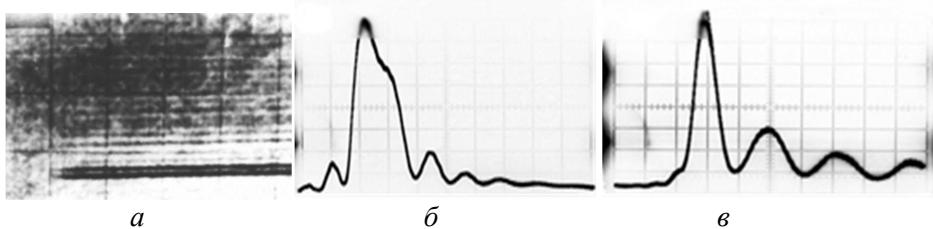


Рис. 1. Анализ дефектных структур АМД-методами *a* - акустическое изображение микротрециины в полупроводнике ( $\text{Si}<111>$ , масштаб 20 мкм/дел.,  $f = 402 \text{ МГц}$ ,  $Z = -16 \text{ мкм}$ ); *б,в* - V(Z)-кривые для полупроводниковых материалов (германий (б) и кремния(в), (масштаб по вертикали 0,4 В, по горизонтали, соответственно, 1 дел.=11 мкм и 16 мкм).

На втором этапе были выявлены дефекты в стеклах различных марок, прошедших механическую обработку при различных параметрах воздействия. Такого типа дефекты не выявляются другими способами (рис.2*a*). В районе их залегания существенно меняется вид V(Z)-кривой (рис.2*b*), что обеспечивает метод выявления микротреций и характеризацию их размеров и распределения в растре. Обнаружение микротрециины в площасти раstra можно осуществить и с помощью режима строки (рис.2*c*). Обнаружена корреляция между параметрами обработки (давление на режущее устройство, глубина пропилов, скорость вращения режущего устройства и проч.) и количеством и размером дефектных областей, образующихся в стекле (рис.3).

На третьем этапе применяли АМД-методы для выявления и характеризации таких опасных дефектов как питтинги, так как очаги питтинговой коррозии являются концентраторами напряжений.

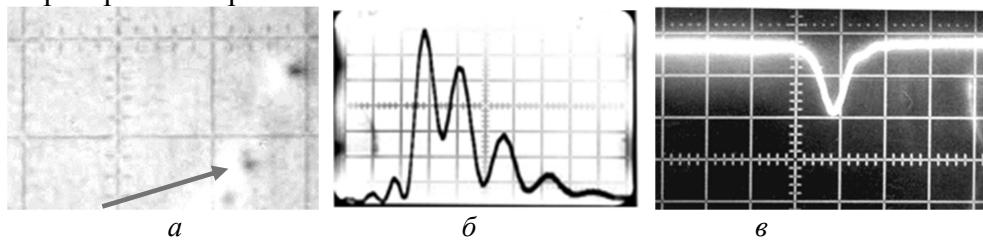


Рис. 2. Выявление и характеристика дефектов в стеклах АМД-методами  
 (а - акустическое изображение трещины субмикронного размера в К-108;  
 б - изменение формы V(Z)-кривых в стекле в районе микротрещины;  
 в - выявление микротрещины в режиме строки (по вертикали 1 дел. = 0,25 В, по горизонтали 1 дел. = 8 мкм)

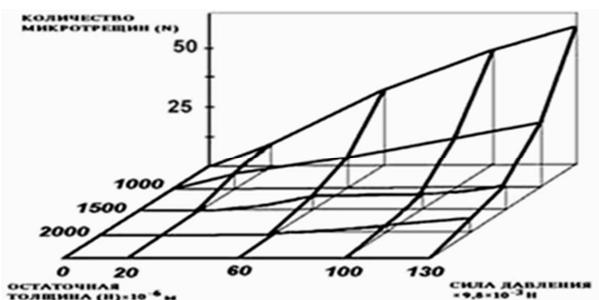


Рис. 3. Корреляция числа дефектов в стекле и параметров обработки (по результатам АМД-методов). Экспериментальная зависимость для стекла ТПС числа выявленных микронеоднородностей  $N$  от силы давления  $F$  на образец и глубины визуализации  $H$

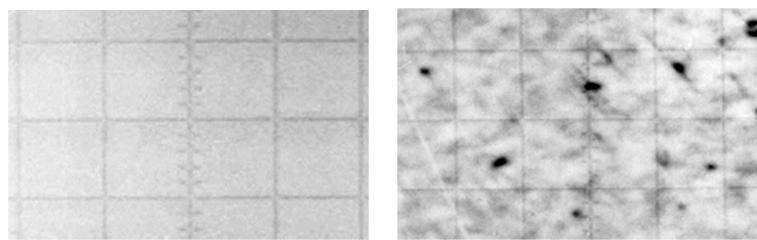


Рис. 4. Оптическое (а)  $210^x$  и акустическое (б) изображения приповерхностного слоя стали (08Х21Н6М2Т), подвергнутой коррозионным испытаниям (б - питтинг, масштаб 35 мкм/дел.,  $f = 402$  МГц,  $Z = -2$  мкм)

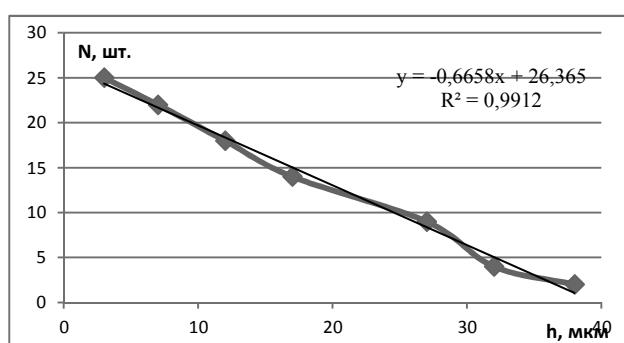


Рис. 5. Зависимость количества выявленных питтингов от глубины визуализации

При этом резко снижаются все механические свойства. В качестве объектов исследований были выбраны образцы сталей, подвергнутых питтинговой коррозии.

Наиболее важными параметрами изменения состояния материала, вне зависимости от вида коррозии и марки стали, является наличие микродефектов, их размеры, количество, скорость роста, а также взаимосвязь этих параметров с прочностными характеристиками. При этом чаще всего сплав не является однородным материалом, и коррозия в нем носит локальный характер. Одной из разновидностей коррозионностойких сталей являются стали аустенитно-ферритного класса, содержащие 18 – 22% Cr, 2 – 7 % Ni, а также Mo и Ti. Для них существует проблема выявления локальных зон поражения, определения таких параметров дефектов, как диаметра и глубины проникновения. Чаще всего на поверхности материала питтинг не проявляется, а при изготовлении шлифов для исследований поверхностный слой часто “заполированывается”(рис.4). Эксперименты по оценке возможности выявления и характеризации микродефектов типа питтингов АМД-методами проводились на образцах сталей 08Х21Н6М2Т и 06Х14Н6МД2Т.

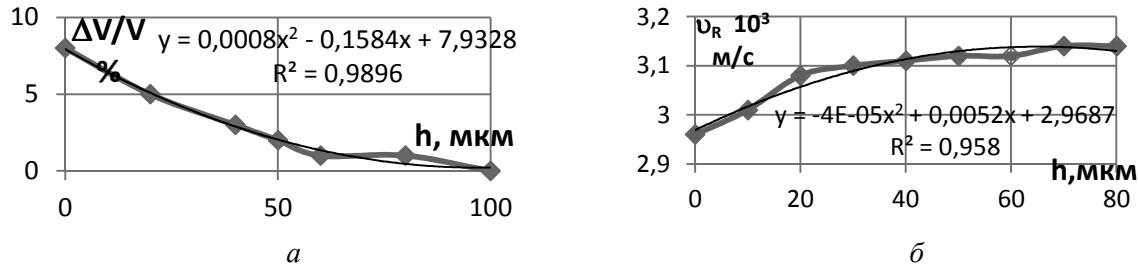


Рис. 6. Характеризация дефектных структур в стали с помощью АМД-методов;  
а - изменение уровня затухания АВ в образце с глубиной зондирования;  
б - изменение скорости ПАВ в образце с увеличением толщины снятого слоя.

На рис. 4 представлены сравнительные оптическое и акустическое изображения поверхности стали 08Х21Н6М2Т после испытаний. Очаги микродефектов на оптическом снимке практически неразличимы. Существенный выигрыш при визуализации таких повреждений предоставляет АМД-метод.

Измеряя на акустическом изображении диаметр питтинга на различных глубинах, получали зависимости его размерного параметра от расстояния до поверхности. С учетом масштаба акустического изображения, размеры питтингов для образцов данной партии лежали в пределах 3 – 12 мкм. С увеличением глубины визуализации количество выявляемых питтингов сокращалось, а их диаметры уменьшались. При этом все отчетливее проявлялось структурное строение образцов. По сериям акустических изображений, аналогичных представленным на рис. 6, получали зависимости количества ( $N$ ) выявляемых питтингов от глубины визуализации (рис. 5).

Для определения интегральной характеристики, позволяющей оценивать изменение параметров поверхности образца в целом более продуктивно использовать  $V(Z)$ -метод. С ростом глубины питтингов и при увеличении их количества в приповерхностном слое стали повышается коэффициент затухания акустических волн, а значит и её значение (рис.8а). Чувствительна к глубине и размерам питтингов и скорость акустических волн (рис.8б). Следовательно, приняв за точку отсчета значение для бездефектного образца, можно по полученной зависимости оценивать степень поражения образца коррозией.

#### Литература

1. Мигель И.А., Кустов А.И. Изучение металлических слоев и полимерных композитов с помощью акустических волн // ФПСМ. 2015. Т. 12. №2. С. 241 -247.
2. Кустов А.И., Мигель И.А. Выработка критериев оценки деформации поверхности твердотельных материалов АМД-методами // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технич. науки. - Тамбов, 2013. Т. 18. Вып.4.Часть 2. С.1875-1877.
3. Кустов А.И., Мигель И.А. Анализ поведения дефектных структур, возникающих в твердотельных материалах, АМД-методами // ФПСМ. Т.13. №4. 2016. С. 490 - 496.

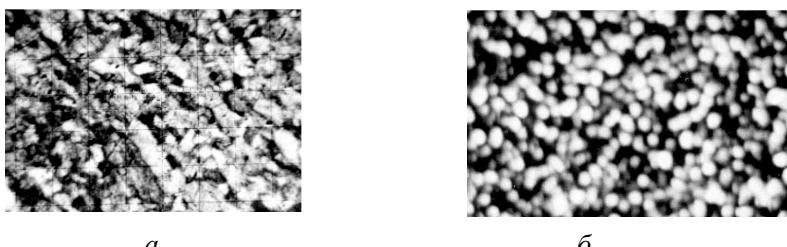
# РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АМД-МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Кустов А.И.<sup>1</sup>, Зеленев В.М.<sup>1</sup>, Мигель И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный педагогический университет, Россия

<sup>2</sup> ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (Воронеж), Россия  
akvor@yandex.ru

Анализ деформационного воздействия на металлические материалы – современная актуальная проблема материаловедения. На наш взгляд для её решения перспективно применение АМД-методов [1,2]. Они позволяют получать серии структурных акустических изображений на различной глубине от поверхности, оценивать по ним степень однородности и изотропности материалов. Акустическое изображение одного из типов стали демонстрируется на рис.1 $a$ . АМД-методы обеспечивают расчет по размеру зерна значений условного предела текучести. На рис. 1 $b$  представлено акустическое изображение ЦТС-керамики, по которому надежно рассчитывается величина пористости и скорости ПАВ в зависимости от температур отжига материалов.



*a*

*b*

Рис. 1. Акустические изображения; *a* - структуры стали, позволяющее рассчитывать прочностные свойства стали по размеру зерна (масштаб: 20 мкм/дел., Z = - 17 мкм), *b* - строение пьезокерамики ЦТС-19 на глубине ~32 мкм (частота 404 МГц, размер по горизонтали 250 мкм)

Используя метод  $V(Z)$ -кривых [3,4], по области периодических осцилляций определяли значение характерного расстояния  $\Delta Z_N$ , а по нему рассчитывали величину скорости  $v_R$  (1 и 2) поверхностных акустических волн (ПАВ). При этом точность измерений, достигающая для ряда материалов для используемого САМ десятков ангстрем, обеспечивается, прежде всего, при высокой однородности подложек.

$$\Delta Z_N = \frac{v_I}{2 \cdot f} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{v_I}{v_R} \right)^2} \right]^{-1} \quad (1) \quad v_R = v_I \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{v_I}{2 \cdot f \cdot \Delta Z_N} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Следующий этап был посвящен традиционным инструментальным экспериментам, позволяющим разрушающим методом находить предел пропорциональности ( $\sigma_{пц}$ ), предел упругости ( $\sigma_u$ ), условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), предел текучести ( $\sigma_t$ ), предел прочности ( $\sigma_b$ ). Эти расчеты производятся на базе полученной экспериментально кривой  $\sigma - \epsilon$ , один из вариантов которой для ст.3 представлен на рис. 2 $a$ .

Экспериментальные данные, полученные для ст.3 с помощью разрывной машины, после предварительной статистической обработки были использованы для построения с помощью MS Excel графической зависимости « $\sigma - \epsilon$ » (рис.2 $a$ ). Условно она была разделена на ряд областей (0 – 3%; 3 – 6%; 6 – 15%; 15 – 20 и 20 – 25%). Анализ процессов в каждой из областей средствами ИТ имело смысл проводить раздельно, рассчитывая присущие материалу параметры (упругие модули,  $E$  и  $G$ , значение предела пропорциональности, условного предела текучести; предела текучести; предела прочности; величины предельной деформации и проч.) (см. рис. 2).

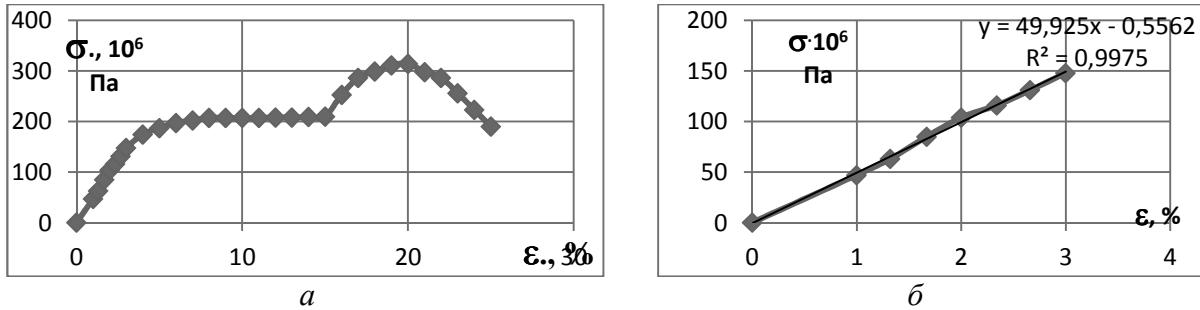


Рис. 2. Экспериментальная кривая, полученная с использованием разрывной машины  
(*a*-общая кривая, *b*-область чисто упругих деформаций)

Из рис. 2 $\delta$  был определен угол наклона линейного участка кривой к оси деформаций. Он составил  $66^{\circ}$ , а тангенс его – 2,246. Напряжению в 148 МПа ( $\sigma_{\text{пп}}$ ) соответствует деформация в  $(6,58 \cdot 10^{-2})\%$ . Отношение этих величин, если выразить его в сотнях ГПа, будет численно равно тангенсу угла наклона прямой упругости к оси деформаций и модулю упругости (в Паскалях) 225 ГПа. Таким образом, на данном этапе были определены предел пропорциональности и модуль упругости материала. Из второй области кривой  $\sigma$ - $\epsilon$  для стали 3 было рассчитано значение  $\sigma_{0,2}$ , которое составило 177 МПа. При деформациях в 8 – 14% для испытуемой стали наблюдалась площадка текучести ( $\sigma_T = 207,5$  МПа).

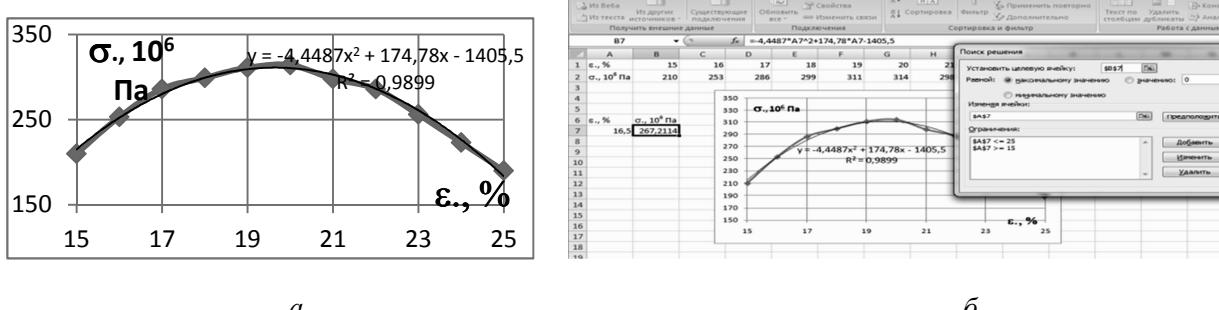


Рис. 3. Расчет предельных деформаций и предела прочности материала с помощью функции-оптимизатора (*a* – вид тренда для экспериментальной кривой; *b* - этап решения)

Для четвертой области кривой  $\sigma$ - $\epsilon$  (рис.3) рассчитывались значения предела прочности ( $\sigma_B$ ) и соответствующая предельная деформация  $\epsilon_B$ . Решение этой задачи осуществлялось на основе алгоритма оптимизации (с использованием функции «Поиск решения» приложения Windows MS Excel). После введения соответствующих ограничений и счета получали оптимальные значения (рис.3 $\delta$ ) искомых величин (оптимальные значения:  $\epsilon_B, \% = 19,64394$ ,  $\sigma_B = 311,184 \cdot 10^6$  Па), которые в пределах погрешности совпадают со стандартными значениями. В качестве альтернативных физических методов определения искомых параметров материалов были выбраны современные инновационные неразрушающие АМД-методы, позволяющие рассчитать для металлических образцов значения упругих модулей  $E$  и  $G$ , величину размера зерна и условного предела текучести по скорости поверхностных акустических волн и из акустических изображений.

$$E = v_R^2 \cdot \frac{2 \rho \cdot (1 + \gamma)^3}{(0,87 + 1,12 \gamma)^2}; \quad (3) \quad G = v_R^2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{1 + \gamma}{0,87 + 1,12 \gamma} \right)^2. \quad (4)$$

На основании выражений 1 и 2 были рассчитаны значения  $v_R$  по  $V(Z)$ -кривой, которое используется для определения значений упругих модулей:  $v_R = 1483 \cdot (1 - (1 - (1483/(2 \cdot 407 \cdot 10^6 \cdot 15,04 \cdot 10^{-6}))^2)^{-1/2} = 3,107 \cdot 10^3$  м/с, где  $\gamma$  - коэффициент Пуассона исследуемого материала. В ходе инструментальных исследований были рассчитаны плотность стали ( $\rho_{\text{ст}} = 7820$  кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент Пуассона ( $\gamma = 0,28$ ). При этом скорость акустических волн в

иммерсионной жидкости при  $20^{\circ}\text{C}$   $v_l = 1483$  м/с.  $v_s \cdot \alpha' = v_R$ , где  $\alpha' = \frac{0,87+1,12 \cdot \gamma}{1+\gamma} = 0,925$ ;  $v_s = v_R/\alpha' = 3,36 \cdot 10^3$  м/с. В соответствии с выражениями 3 и 4 рассчитывали значения упругих модулей ( $E = 226 \cdot 10^9$  Па и  $G = 88,3 \cdot 10^9$  Па), которые совпадали в пределах погрешности со значениями, приводимыми в известных изданиях [5].

На следующем этапе рассматривались образцы сталей с микротрецинами, образовавшимися как в процессе изготовления, так и после деформационных воздействий различного типа. На рис.4 представлены корреляционные зависимости степени деформации и размера зерна стали, а также скорости ПАВ ( $v_R$ ). Измеряя скорость ПАВ с помощью АМД-методов [6] можно надежно определять как размер зерна независимым способом, так и степень деформации. При образовании в результате деформации трещин в металле существенно изменяется характерная  $V(Z)$ -кривая (рис.4 $\epsilon$ ), что позволяет оценить и размер, и глубину залегания дефекта. Пример выявления с помощью САМ микротреций в сталях по акустическому изображению и с помощью  $V(Z)$ -кривых представлен на рис.5).

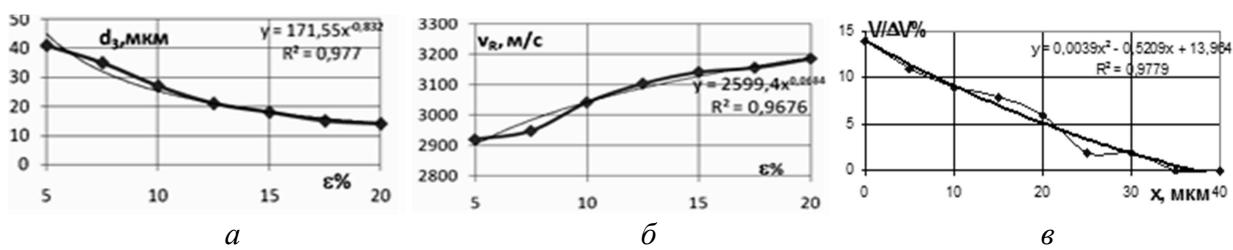


Рис. 4. Корреляционная зависимость (а) размера зерна от степени деформации (ст. 20ХГСА); б) Зависимость скорости ПАВ от степени деформации (ст. 20ХГСА); в) изменение коэффициента затухания АВ в меди с трещиной после деформационного воздействия

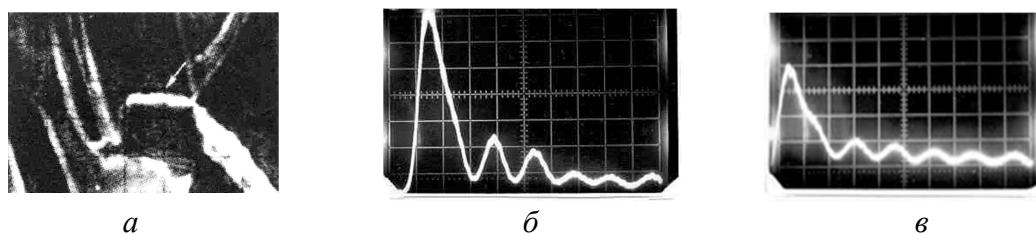


Рис. 5. Обнаружение дефектов металлических материалов после деформации; а - акустическое изображение трещины в стали аустенитного класса ( $Z = -40$  мкм, масштаб 20 мкм/дел.); б -  $V(Z)$ -кривые для одного из сортов стали (изменяется форма в районе микротреции; ст. 30ХГСМЛ,  $v_R = 3,18 \cdot 10^3$  м/с,  $\Delta Z_N = 14,68$  мкм,  $(\Delta V/V\%)_{\max} = 37\%$ , масштаб по вертикали 1 дел.= 0,25 В, по горизонтали – 1 дел.=12,2 мкм).

#### Литература

1. Мигель И.А., Кустов А.И. Изучение металлических слоев и полимерных композитов с помощью акустических волн // ФПСМ. Т. 12. №2. 2015.с. 241 -247.
2. Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов // ФПСМ. Т. 11. №4/2. 2014. С. 592 -598.
3. Кустов А.И. Мигель И.А. Изменение акустических характеристик материалов как явление, сопровождающее их пластичность и разрушение // Вестник Тамбовского университета. Сер. Ест. и техн. науки. Тамбов. 2016. Т.21. Вып.3. С. 1097-1101.
4. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, и др.; п/р И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 С.
5. Кустов А.И., Мигель И.А. Анализ трансформации структуры приповерхностных слоев сталей и их влияние на процесс упрочнения АМД-методами // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, Материаловедение. Т.18. №4.2016. С. 134-146.

# БОЛЬШИЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В АЛЮМИНИИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В.

Алтайский государственный университет, Барнаул  
makarov@phys.asu.ru

## Введение

Исследования процессов структурной перестройки в металлических материалах в условиях больших пластических деформаций являются актуальными, как с точки зрения фундаментальных подходов, так и практического применения [1-3]. Большие пластические деформации предложено рассматривать, начиная с относительной деформации  $\epsilon = 100\%$  [2]. При этом важно, чтобы в схеме напряженного состояния деформируемого твердого тела имелась существенная компонента напряжений всестороннего сжатия, а пластическое течение сопровождалось циклическими процессами динамической рекристаллизации.

При больших пластических деформациях значительно возрастает плотность «неравновесных» границ зерен [4], которые ответственны за аномальные явления проскальзывания, взаимодействия с решеточными дефектами и определяют высокий уровень пластичности. В работе [5] показано, что переход к высокодеформированному состоянию сопровождается изменениями в структуре материала и его механического поведения. Так, например, при больших пластических деформациях медных образцов наблюдали пространственную циклическую изменение структурного состояния: фрагментированная структура – рекристаллизационная структура [6].

Хорошо известно, что процессы структурной перестройки при пластической деформации сопровождаются акустической эмиссией [7], однако во многих публикациях акустическая эмиссия – пассивный эффект. Влияние акустической эмиссии на процессы накопления деформации не рассматривается.

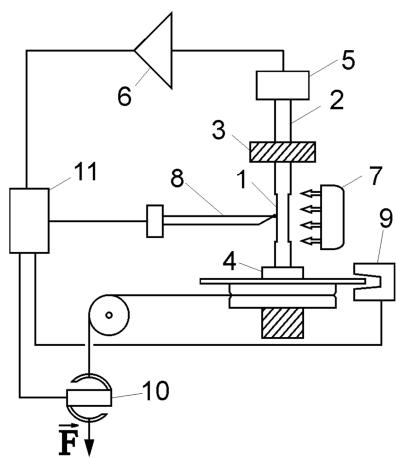


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – образец, 2 – волновод, 3 – неподвижный держатель, 4 – подвижный держатель, 5 – пьезодатчик с предварительным усилителем, 6 – усилитель, 7 – нагреватель, 8 – термопара, 9 – датчик деформации, 10 – датчик нагрузки, 11 – аналого-цифровой преобразователь, компьютер.

Цель работы: исследование процессов накопления больших деформаций в алюминии при циклическом нагружении в условиях действия механических нагрузок и высоких температур, анализ активной роли акустической эмиссии в этих процессах.

## Методика экспериментов

Для исследования больших пластических деформаций и акустической эмиссии была использована так называемая мягкая схема нагружения, которая позволила фиксировать деформацию при пластическом течении как функцию параметров силового воздействия в условиях высоких температур.

Реализованная в эксперименте схема сдвигового нагружения, позволила провести исследования накопления деформации в материале без существенного изменения поперечного сечения и формы деформированных образцов.

Механическое нагружение, измерение деформации, температуры и среднеквадратичного напряжения акустической

эмиссии проводили с помощью установки, схематичное изображение которой приведено на рис. 1.

Нагружение с постоянной нагрузкой в цикле осуществляли в ходе непрерывного нагрева образца со скоростью около 1 град/с. В каждом следующем цикле нагрузка возрастала с шагом 5 МПа в интервале напряжений от 10 до 30 МПа

Образец представлял собой цилиндрический стержень длиною 35 см и диаметром около 6 мм, на одном конце которого для локализации деформации была сделана проточка длиной 40 мм и диаметром 4 мм. Нагрев образца осуществлялся именно в области локализации деформации. Остальную часть стержня не нагревали, она выполняла роль волновода.

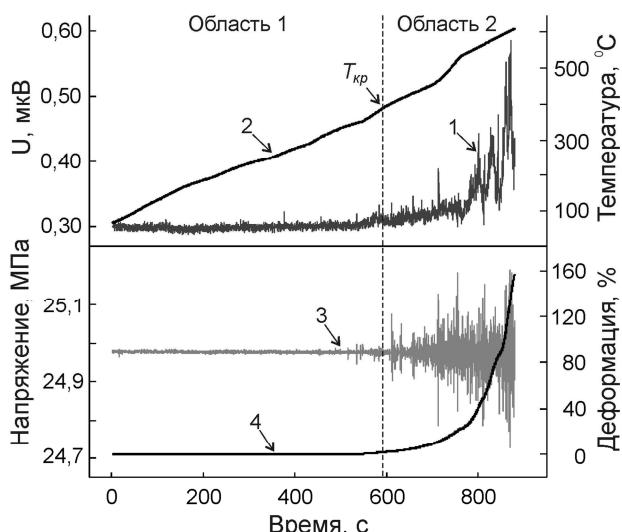


Рис. 1. Акустическая эмиссия (1), температура (2), механическое напряжение (3) и накопление деформации (4) при нагреве алюминия при постоянной нагрузке 25 МПа.

### Экспериментальные результаты

Характерные экспериментальные данные по накоплению деформации, акустической эмиссии и механическому напряжению в условиях нагрева при постоянной нагрузке (25 МПа) приведены на рис. 1.

Основной прирост деформации  $\varepsilon$  в цикле осуществляется в высокотемпературной области 2 ( $\varepsilon_2=155,4\%$  при  $\sigma=25$  МПа), начиная с некоторой критической температуры  $T_{kp}=354$  °C; в низкотемпературной области 1 величина накопленной деформации значительно ниже ( $\varepsilon_1=2,3\%$ ) (табл. 1, рис. 1). Средняя скорость накопления деформации в области 2, как следует из приведенных данных (табл. 1), на порядок выше скорости деформации в низкотемпературной области.

Значения температурных и энергетических параметров в неизотермических циклах нагружения технического алюминия.

Нагрузка, МПа	Температура, °C			Область 1	Область 2	Энергетический параметр J, $10^{-12} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$				Деформация $\varepsilon$ , Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$					
	Область 1	$T_{kp}$	Область 2			Область 1		Область 2		Область 1		Область 2			
						$\varepsilon_1$ , %	$\dot{\varepsilon}_1$ , $\text{с}^{-1}$	$\varepsilon_2$ , %	$\dot{\varepsilon}_2$ , $\text{с}^{-1}$	$\varepsilon_1$ , %	$\dot{\varepsilon}_1$ , $\text{с}^{-1}$	$\varepsilon_2$ , %	$\dot{\varepsilon}_2$ , $\text{с}^{-1}$		
10	38 - 481	481	481 - 640	10,5	97,8	1,6	$1,9 \cdot 10^{-3}$	37,1	$13 \cdot 10^{-3}$						
15	49 - 510	510	510 - 621	10,1	154,4	4,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	147,1	$22 \cdot 10^{-3}$						
20	30 - 434	434	434 - 630	10,4	192,7	2,6	$1,1 \cdot 10^{-3}$	161,3	$26 \cdot 10^{-3}$						
25	65 - 354	354	354 - 626	10,1	105,8	2,3	$1,5 \cdot 10^{-3}$	155,4	$39 \cdot 10^{-3}$						
30	33 - 314	314	314 - 461	10,3	95,5	1,8	$1,38 \cdot 10^{-3}$	34,3	$40 \cdot 10^{-3}$						

Как следует из данных табл. 1 накопленная деформация до разрушения алюминиевого образца за 5 циклов (нагрев-охлаждение) составила 545 %.

### Обсуждение результатов

Согласно нашим работам, накопление деформации в металлах и сплавах в условиях мягкой схемы нагружения и высоких температур осуществляется монотонно-скаккообразно (в масштабе объема деформируемого материала) - макроскопические деформационные скачки перемежаются с монотонными участками накопления деформации [8]. Такая классификация определяется исключительно скоростными параметрами накопления деформации, а амплитуда

скачков и длительность монотонных участков существенно зависят от температурно-силовых параметров в цикле нагружения.

Выше критической температуры  $T_{kp}$  в области 2 характер накопления деформации монотонно-скаккообразный (или квазискаккообразный), о чем свидетельствуют осцилляции механического напряжения (рис. 1, зависимости 2, 3), причем амплитуда осцилляций увеличивается, как и среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии, при повышении температуры. Возрастание среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии свидетельствует о существенном увеличении колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объеме образца. Как было показано, накопление колебательной энергии в объеме деформированного материала может осуществляться только за счет формирования стоячих волн на естественных резонаторах [9].

Переход к высокодеформированному состоянию в алюминии при достижении критической температуры ( $T_{kp}$ ) осуществляется как результат совместного действия термических флуктуаций, механических напряжений и колебательной энергии акустической эмиссии в элементарном деформационном акте. Переходе от монотонного накопления деформации (область 1) с низкой скоростью к квазискаккообразному (область 2) с высокой скоростью после достижения критической температуры ( $T_{kp}$ , см. рис. 2) можно трактовать как деформационных структурный переход, представляющий собой переход от накопления деформации, контролируемой переползанием дислокаций, к накоплению, контролируемому преимущественно зернограницыми процессами [10].

### Заключение

Накопление макродеформации (до 150 % в цикле) в алюминии в условиях высоких температур и осциллирующего характера механического напряжения осуществляется как квазискаккообразный процесс при достижении температурно-силовыми параметрами и колебательной энергией акустической эмиссии критических значений. Квазискаккообразное накопление деформации контролируется преимущественно зернограницыми процессами производства полных дислокаций границами зерен.

### Литература

1. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Глезер А.М. О природе сверхвысокой пластической (мегапластической) деформации // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. - Т.71. - №12 - С.1764-1772.
3. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // ФТТ. – 2010. – Т.52. – №.6. С.1090 – 1097.
4. Валиев Р.З. // Рос. Нанотехнологии. 2006. Т.1. №1-2. С.208.
5. Фирстов С.А., Даниленко Н.И. и др. // Изв. Вузов. Физика. 2002. №3. С.41.
6. Быков В.М., Лихачев оВ.А., Никонов Ю.А. и др. // ФММ. 1978. Т.45. №.1. С.163.
7. Макаров С.В., Плотников В.А. Об акустических эффектах корреляции элементарных деформационных актов в металлических материалах при высокотемпературном переходе // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 21-25
8. Плотников В.А., Макаров С.В. Деформационные эффекты и акустическая эмиссия при высокотемпературной деформации алюминия // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 6. С. 65–72.
9. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // Известия вузов. Физика. 2014. №7. С. 81-86.
10. Гуткин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. // ФТТ, 2005. Т. 47 № 9. С. 1602-1613.

# ДЕФОРМАЦИОННЫЙ СТРУКТУРНЫЙ ПЕРЕХОД В АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В.

Алтайский государственный университет, Барнаул  
makarov@phys.asu.ru

## Введение

Характерным откликом алюминиево-магниевых сплавов на механическое нагружение является прерывистая текучесть, проявляющаяся в формировании полос деформации в области локализации пластической деформации [1]. Прерывистая текучесть на зависимости напряжение – деформация представляет собой скачки (зубцы) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из критического зародыша полосы.

Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующие с появлением полос деформации, причем каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [1,2].

Другим проявлением прерывистой текучести является прерывистая ползучесть (или эффект Савара-Массона [3]), реализующаяся в тех же сплавах на кривых ползучести в виде последовательности скачков деформации [4]. Установлено, что прерывистая ползучесть даже при комнатной температуре развивается как спонтанная потеря механической устойчивости путем зарождения и распространения по поверхности образца полос макролокализации деформации, сопровождающейся формированием деформационного скачка величиной в несколько процентов. Сделан вывод, что деформационный скачек представляет собой пространственную и временную организацию деформационных полос, характеризующую пластическую неустойчивость нагруженного материала [4]. Отображением пространственно-временной организации деформационных полос является осциллирующий вид реакции системы машина-образец (силовой отклик) на скачкообразный прирост деформации [4,5]. Природа пространственной и временной корреляции в системе полос деформации согласно [4] связана каскадным механизмом размножения полос, а фактором корреляции выступает локализованные на границе деформационной полосы механические напряжения и дальнодействующие напряжения изгиба.

В наших работах установлен двойственный характер накопления деформации: монотонный - в области низких температур и скачкообразный (квазискачкообразный) – в области высоких температур [6,7]. В этой связи целью данной работы является проведение исследования деформации и акустической эмиссии в алюминиево-магниевом сплаве при нагружении в широком интервале температур вплоть до температуры плавления и анализ двойственного характера накопления деформации.

## Экспериментальные результаты

Описание объекта исследования и методики экспериментов приведены в публикации [8]. В цикле нагрев-охлаждение в температурном интервале  $25 - 500^{\circ}\text{C}$  нагрузка образца постоянна и изменялась в диапазоне 40 – 200 МПа с шагом 10 МПа.

Накопление деформации при нагреве образца до  $500^{\circ}\text{C}$  и механическом напряжении 100 МПа осуществляется двояким образом: до некоторой критической температуры ( $T_{kp}$ ) монотонным путем (область 1), а затем квазискачкообразным (область 2) (рис. 1).

При достижении критической температуры ( $T_{kp}$ ) (на рис. 1 температура перехода от области 1 к области 2) существенно увеличивается среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (зависимость 1) и скорость накопления деформации, чему соответствуют осцилляции механического напряжения (зависимость 3), причем амплитуда осцилляций увеличивается при повышении температуры. Осцилляции механического напряжения согласно [4] есть реакция системы машина-образец на скачки деформации, то есть

наблюдаемый в экспериментах квазискачкообразный характер накопления деформации действительно представляет последовательность деформационных скачков разделенных малыми монотонными промежутками.

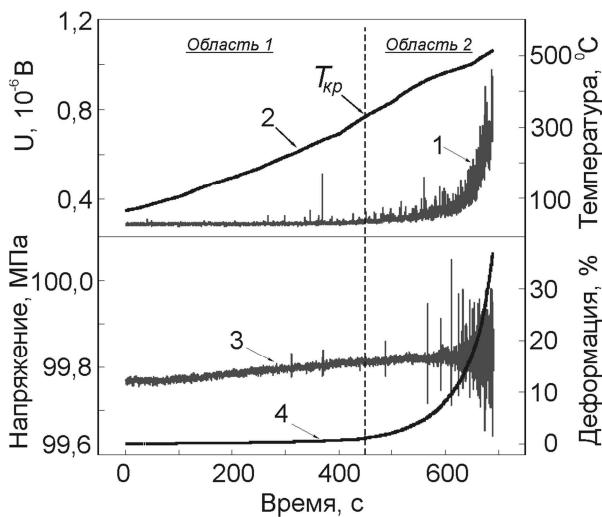


Рис. 1. Акустическая эмиссия (1), температура (2), механическое напряжение (3) и накопление деформации (4) при нагреве образца АМг5 в условиях действия постоянной нагрузки 100 МПа.

область 2, а также значительному увеличению в области 2 может свидетельствовать о деформационном структурном переходе при термомеханическом нагружении материала.

Деформационный структурный переход представляет собой переход от накопления деформации, контролируемой термически активируемым переползанием дислокаций [9], к накоплению деформации, контролируемым зернограницами процессами производства полных (решеточных) дислокаций на тройных зернограницах стыках [10].

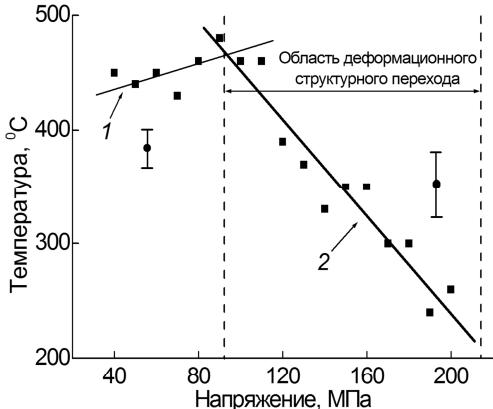


Рис. 2. Зависимость граничной температуры деформационного структурного перехода от механического напряжения в циклах.

напряжения это зависимость 2 на рис. 2, так как реализуется лишь при достижении механическими напряжениями некоторого критического значения, примерно равное 90 МПа. При достижении механическими напряжениями критического значения 90 МПа величина колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объеме достигает критических значений. Накопление энергии акустической эмиссии возможно лишь путем формирования стоячих акустических волн первичными

Заметим, что переход к осцилляции механического напряжения может свидетельствовать о существенном изменении микромеханизма накопления деформации, а увеличение амплитуды акустических импульсов по мере повышения температуры характеризует увеличение колебательной энергии акустической эмиссии в объеме деформируемого материала.

Анализ температурной точки перехода ( $T_{kp}$ ) из области 1 в область 2 с помощью двойной экспоненциальной зависимости показал, что граничная температура перехода зависит от механического напряжения как функция с максимумом. Совокупность полученных данных по осцилляциям механического напряжения в области 2, граничным температурно-силовым параметрам процесса, изменению скорости накопления деформации при переходе из области 1 в

область 2, а также значительному увеличению в области 2 может свидетельствовать о деформационном структурном переходе при термомеханическом нагружении материала.

На рис. 2 «левая» и «правая» ветви этой зависимости аппроксимированы линейными функциями. Зависимость 1 на рис. 2 характеризует температуру деформируемого объема, обеспечивающей диффузионно-контролируемый приток дислокаций путем переползания в активированную плоскость скольжения при заданном уровне механического напряжения. Так как переползание дислокаций, контролируемое диффузией, является единственным процессом, обеспечивающим приток дислокаций в плоскости скольжения, то для накопления деформации в области 1 повышение температуры является естественным механизмом повышения интенсивности диффузионных процессов.

Собственно температура деформационного структурного перехода как функция механического

напряжения это зависимость 2 на рис. 2. То есть, как показано на рис. 2, такой переход реализуется лишь при достижении механическими напряжениями некоторого критического значения, примерно равное 90 МПа. При достижении механическими напряжениями критического значения 90 МПа величина колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объеме достигает критических значений. Накопление энергии акустической эмиссии возможно лишь путем формирования стоячих акустических волн первичными

сигналами (точнее волновыми пакетами) акустической эмиссии на естественных резонаторах в деформируемом объеме образца [11].

### *Заключение*

При высокотемпературной деформации алюминия и его сплавов переход от монотонного накопления деформации к скачкообразной (квазискачкообразной) можно трактовать как деформационный структурный переход, представляющий собой переход от накопления деформации, контролируемой переползанием дислокаций, к накоплению, контролируемому преимущественно зернограничными процессами. Осциллирующий характер силового отклика после деформационного структурного перехода при достижении температурно-силовыми параметрами и колебательной энергией акустической эмиссии критических значений свидетельствует о скачкообразном процессе накопления деформации в высокотемпературной области. Скачкообразное накопление деформации обусловлено корреляцией элементарных деформационных актов (зарождение и расширение деформационных полос) – есть результат совместным действия тепловых флюктуаций, статических смещений поля механических напряжений и динамических смещений стоячих акустических волн в объеме деформируемого материала.

### *Литература*

1. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ, 1993. Т. 75, №5. С. 31-35.
2. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магниевых сплавов // ФММ, 1996. Т. 81, № 1. С. 156-162.
3. Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Лебедкин М.А. Известия РАН. Серия физ. 2006. Т. 20. № 9. С. 1372-1376.
4. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Денисов А.А. Макролокализация пластической деформации при прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6 // ЖТФ, 2014. Т. 84. №4. С. 40-46.
5. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф. Прерывистая ползучесть и пространственно-временные структуры макролокализованной пластической деформации // ФТТ. 2014. Т. 58. № 5. С. 848-855.
6. Плотников В.А., Макаров С.В. Деформационные эффекты и акустическая эмиссия при высокотемпературной деформации алюминия // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 6. С. 65-72.
7. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Деформационное поведение алюминиево-магниевого сплава в условиях термомеханического нагружения // Известия АлтГУ. 2015. № 2. С. 36-39.
8. Макаров С.В., Плотников В.А. Об акустических эффектах корреляции элементарных деформационных актов в металлических материалах при высокотемпературном переходе // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 21-25.
9. Мышляев М.М. Ползучесть полигонизованных структур. – Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения. М: Наука, 1972. С. 194-234.
10. Гуткин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. Зернограничное скольжение и эмиссия решеточных дислокаций в нанокристаллических материалах при сверхпластической деформации // ФТТ, 2005. Т. 47 № 9. С. 1602-1613.
11. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // Известия вузов. Физика. 2014. № 7. С. 81-86.

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА КИНЕТИКУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ СПЛАВА Ti-Hf-Ni-Cu

Беляев С.П.<sup>1,2</sup>, Рубаник В.В.<sup>3,4</sup>, Реснина Н.Н.<sup>1,2</sup>, Рубаник В.В. мл.<sup>3,4</sup>,  
Шеляков А.В.<sup>5</sup>, Непомнящая В.В.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ Курчатовский институт, Гатчина

<sup>3</sup>Витебский государственный технологический университет, г. Витебск

<sup>4</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск

<sup>5</sup>Московский инженерно-физический институт, г. Москва  
niapomniashchaya@mail.ru

Механоактивация – процесс образования более химически активного вещества предварительной механической обработкой, которая происходит, когда скорость накопления дефектов превышает скорость их исчезновения. Традиционно это реализуется в так называемых энергонагруженных аппаратах: центробежных, планетарных и струйных мельницах, дезинтеграторах и др., где сочетаются высокие частота и сила механического воздействия. Наряду с традиционными методами механоактивации ультразвуковая механоактивация имеет большой потенциал, в связи с чем необходимо глубже проанализировать процессы, лежащие в ее основе, для полного использования возможностей ультразвука.

Целью данной работы явилось исследование влияния ультразвуковой механоактивации на кинетику кристаллизации и мартенситные превращения аморфного сплава с памятью формы методом дифференциально сканирующей калориметрии.

Для исследований были выбраны аморфные ленты на основе Ti-Hf-Ni-Cu. Состав лент приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав аморфной ленты

Содержание элементов в ат. %			
Ti	Ni	Hf	Cu
40,7	44,8	9,5	5

Ультразвуковую механоактивацию аморфных лент проводили при комнатной температуре 25°C, которая находится ниже температур структурной релаксации материала. Материал подвергался воздействию ультразвуковых колебаний амплитудой 10 мкм частотой 22 кГц. Длительность ультразвукового воздействия в волноводе продольных ультразвуковых колебаний составляла 1, 5 и 10 минут. После ультразвуковой обработки в сплавах была исследована кристаллизация сплава и параметры мартенситных переходов в закристаллизованных образцах.

На рисунке 1 представлены калориметрические кривые, полученные при нагреве аморфных сплавов с различной ультразвуковой обработкой. Видно, что при нагреве на калориметрических кривых в интервале температур 500 – 510°C наблюдается пик выделения тепла, который соответствует кристаллизации сплава. По калориметрическим кривым, представленным на рисунке 1, были определены температуры и теплота кристаллизации (таблица 2).

Из полученных данных видно, что с увеличением длительности воздействия ультразвуковых колебаний температуры кристаллизации увеличиваются, а теплота, которая выделяется при переходе из аморфной фазы в кристаллическую, уменьшается по сравнению с исходным материалом, без ультразвуковой механоактивации.

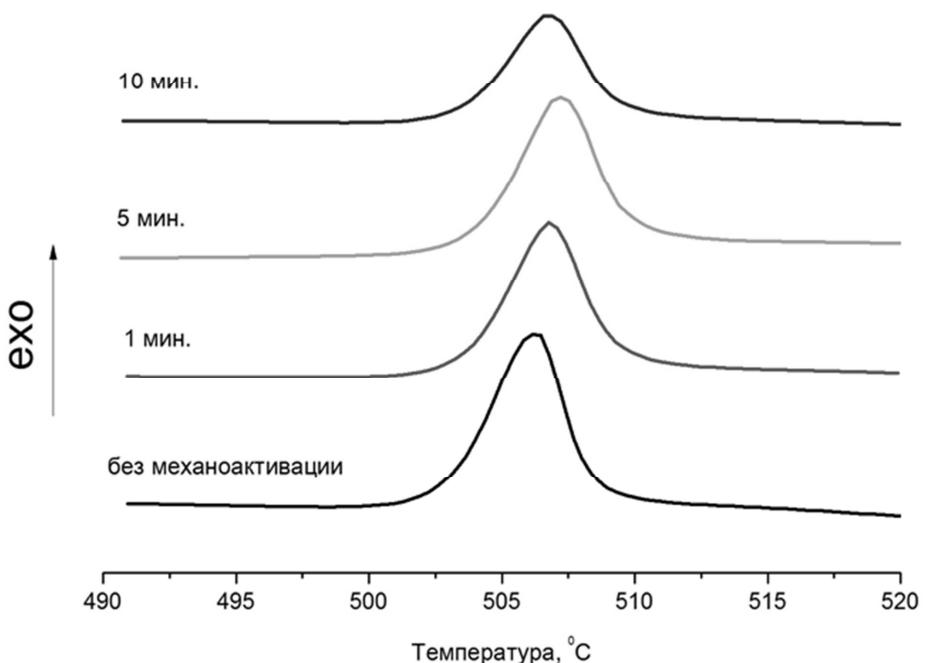


Рисунок 1 - Калориметрические кривые, полученные при нагреве аморфного сплава

Из полученных данных видно, что с увеличением длительности воздействия ультразвуковых колебаний температуры кристаллизации увеличиваются, а теплота, которая выделяется при переходе из аморфной фазы в кристаллическую, уменьшается по сравнению с исходным материалом, без ультразвуковой механоактивации.

Таблица 2 - Температуры и теплота кристаллизации сплава Ti<sub>40.7</sub>Hf<sub>9.5</sub>Ni<sub>44.8</sub>Cu<sub>5</sub>

Длительность воздействия ультразвуковых колебаний, мин	Кристаллизация			
	T <sub>h</sub> , [°C]	T <sub>n</sub> , [°C]	T <sub>k</sub> , [°C]	E, [Дж/г]
0	502	506	508,5	27,5
1	503,5	506	509	14,99
5	504	507	510	24,21
10	503,5	506,5	510	25,85

Для того, чтобы установить могут ли сплавы после ультразвуковой механоактивации претерпевать мартенситные переходы, а так же для того, чтобы определить параметры фазовых переходов, образцы после кристаллизации охлаждали и нагревали в интервале температур от 100 до -100 °C, полученные калориметрические кривые представлены на рисунке 2. Полученные температуры и энергии мартенситных переходов представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3 – Влияние длительности ультразвуковой механоактивации на параметры мартенситных переходов

Длительность воздействия ультразвуковых колебаний, мин	M <sub>h</sub> , [°C]	M <sub>k</sub> , [°C]	A <sub>h</sub> , [°C]	A <sub>k</sub> , [°C]	E <sub>пр</sub> , [Дж/г]	E <sub>обр</sub> , [Дж/г]
0	25	22	69	74	22	19,5
1	22	19,5	68,9	72,5	19	16,5
5	22	19	69	73	18,3	16,4
10	-5	-1,5	48	53	12	11,9

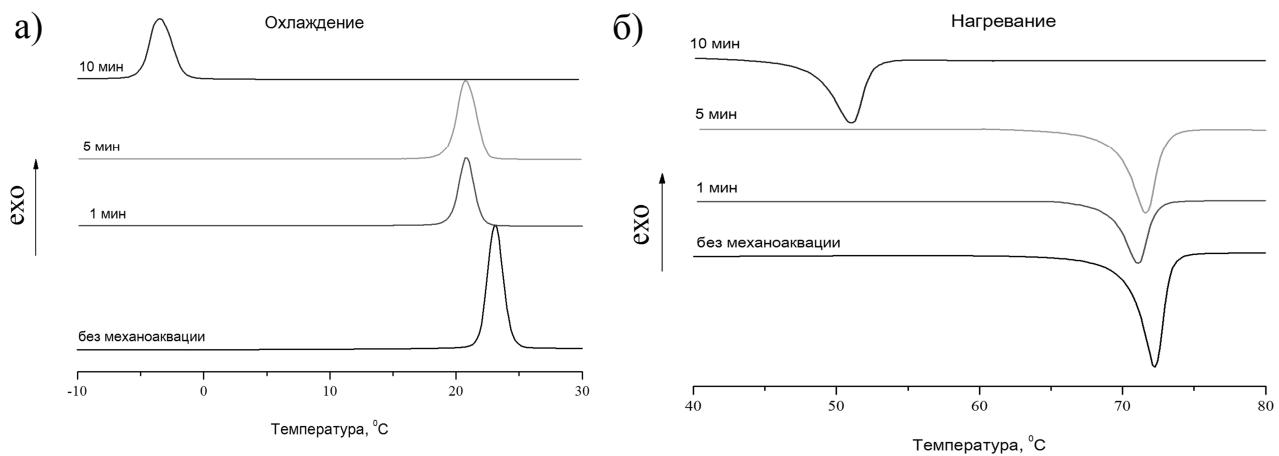


Рисунок 2- Калориметрические кривые мартенситных превращений аморфного сплава при охлаждении (а) и нагревании (б)

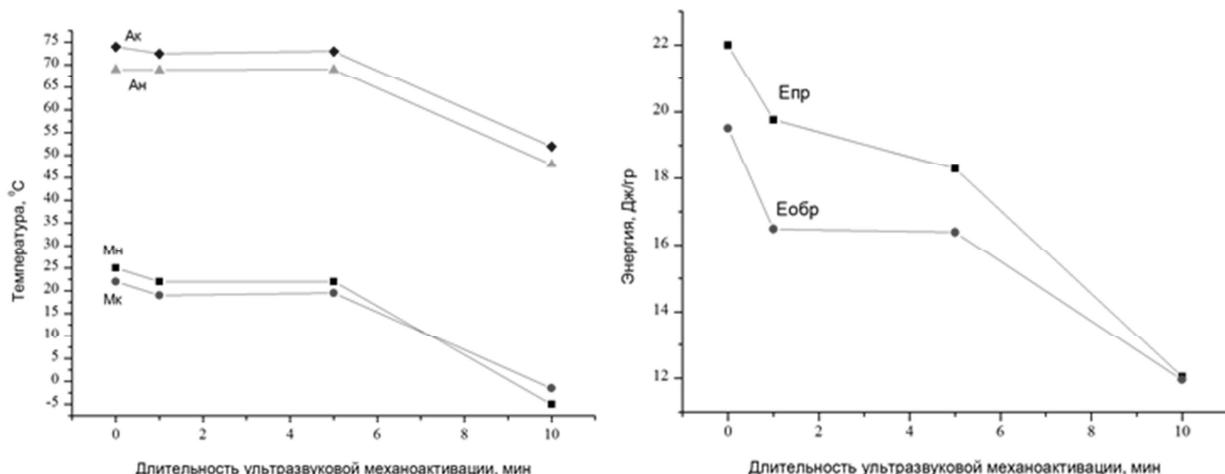


Рисунок 3- Зависимости температур мартенситных превращений (а) и энергий (б), выделившихся при прямом и обратном превращениях

Таким образом, полученные результаты показали, что ультразвуковая механоактивация меняет температуры и энергию кристаллизации сплава Ti<sub>40,7</sub>Hf<sub>9,5</sub>Ni<sub>44,8</sub>Cu<sub>5</sub>, расширяет температурный интервал кристаллизации. Кроме этого механоактивация оказывает влияние и на параметры термоупругих мартенситных переходов, температуры и теплота которых поникаются при различной длительности воздействия ультразвуком. Можно предположить, что эти явления связаны с изменением размера зерна кристаллической фазы.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-58-00093-Бел-а Белорусского фонда фундаментальных исследований № Т16Р-203. Работа Шелякова А.В. выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ при поддержке Министерства образования и науки РФ, Договор 02.A03.21.0005.*

# ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦ НА ПРОЦЕСС ИХ ВВЕДЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ РАСПЛАВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Промахов В.В.<sup>1,2</sup>, Кудряшова О.Б.<sup>1</sup>, Ворожцов С.А<sup>2</sup>, Ворожцов А.Б<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск  
vvprromakhov@mail.ru

Развитие авиакосмической и автомобильной промышленности обуславливает потребность в новых материалах, обеспечивающих минимальные показателя веса конструкций в сочетании с заданными физико-механическими свойствами. Большое значение в этой области имеют алюминиевые сплавы и композиты на их основе [1].

При введении в расплав металла керамических частиц для создания композиционных сплавов с повышенными свойствами возникает ряд специфических проблем. Прежде всего, это проблема смачивания и равномерного распределения частиц по всему объему металла. Модифицирующие частицы, как правило, плохо смачиваются расплавом. Если речь идет о введении субмикронных частиц, то в ряде случаев они представляют собой рыхлые наноструктурированные агломераты [2]. Поры и пустоты таких агломератов наполнены воздухом, что также мешает введению частиц в расплав, так как они будут всплывать [3].

Таким образом, непосредственное введение мелкодисперсных частиц в расплав металла невозможно и для решения этой проблемы применяют различные воздействия: вибрацию, ультразвук, механическое перемешивание и т.п. Механизмы воздействия различны [4], но в любом случае такая обработка расплавов требует специального, часто дорогостоящего и сложного, оборудования, особенно в масштабах промышленного производства.

Для обработки расплава и введения частиц в расплав на практике часто используют ультразвуковое воздействие. Предполагается, что ультразвуковая кавитация способствует смачиваемости неметаллических частиц и их лучшему распределению по объему. Одна из гипотез, которая поясняет повышение смачиваемости в процессе ультразвуковой обработки основана на том, что в результате возникающих кавитационных эффектов расплав металла эффективно проникает в поры и капилляры неметаллических частиц [5]. Качественно процесс можно описать следующим образом. В условиях развитой ультразвуковой кавитации звуковое поле «загоняет» расплав в капиллярные каналы и поры частиц, даже если они плохо смачиваются. Кавитационные пузырьки, пульсируя и схлопываясь вблизи агломератов, создают избыточное давление, позволяющее жидкости проникнуть в узкие поры и преодолеть капиллярное давление. Насыщение агломерата частиц расплавом существенно меняет его свойства и облегчает его разделение на отдельные частицы (деагломерацию) с помощью сил вязкого трения на фронте ультразвуковой волны.

На краевой угол смачивания влияет множество факторов: чистота поверхности, шероховатости. Эти факторы могут как увеличить, так и уменьшить величину краевого угла смачивания. Известно также, что электрический заряд поверхности улучшает смачивание этой поверхности жидкостью, независимо от знака заряда [6]. Таким образом, если частицы, вводимые в расплав, будут нести на себе электростатический заряд, их смачиваемость должна увеличиться. Сообщить заряд поверхности частиц можно разными способами, вероятно, самый простой из них – распыление частиц с помощью электростатического пистолета.

Цель данной работы – теоретическое исследование возможности введения наноструктурированных частиц в расплав при электростатической зарядке их поверхности, в том числе, при воздействии ультразвуком.

В соответствии с законом Юнга, краевой угол смачивания  $\theta$  определяется выражением:

$$\sigma_{31} = \sigma_{23} + \sigma_{12} \cos \theta, \quad (1)$$

где  $\sigma_{31}$  – поверхностное натяжение (удельная поверхностная энергия) твердого тела на границе с воздухом,  $\sigma_{23}$  – межфазная энергия на границе твердого тела с жидкостью,  $\sigma_{21}$  – энергия на границе жидкости и газообразной фазы.

Поверхностное натяжение характеризует силу  $F$ , действующую на единицу длины линии трехфазного контакта  $l=\pi d$ , где  $d$  – диаметр частицы. С другой стороны, изменение силы, действующей на линию контакта фаз, связанное с зарядкой поверхности, составит  $\Delta F = EQ = \frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon S}$ . Тогда при накоплении электрических зарядов на поверхности материала (электризации) поверхностное натяжение увеличивается на величину:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{l} = \frac{Q^2}{2\pi\epsilon\epsilon_0 S d}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $Q$  – электростатический заряд поверхности,  $S$  – площадь поверхности.

При увеличении заряда поверхности растет поверхностное натяжение вещества частицы (2), а значит, в соответствии с выражением (1), и косинус угла смачивания – смачиваемость поверхности увеличивается:

$$\Delta \cos \theta = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{21}} = \frac{Q^2}{2\pi\epsilon\epsilon_0\sigma_{21} S d} \quad (3)$$

Если изначально угол  $\theta_0 > 90^\circ$ , из формулы (3) можно получить выражение для заряда поверхности  $Q_*$ , необходимого для выполнения условий:  $\theta=90^\circ$ ,  $\cos \theta=0$ , что соответствует смачиваемости вещества частицы металлом:

$$Q_* = \sqrt{2\pi\epsilon\epsilon_0\sigma_{21} S d |\cos(\theta_0)|} \quad (4)$$

В работе [2] предложен кавитационный механизм проникновения металла в поры и каналы наноструктурированных частиц при ультразвуковом воздействии. При этом считается, что давление, создаваемое при схлопывании кавитационных пузырьков  $p_{ex}$ , пропорционально интенсивности ультразвука [7], а суммарное давление жидкости в капилляре определяется известным выражением:

$$p = p_{ex} + \frac{2\sigma \cos \theta}{R_{cr}} = p_{ex} + \Delta p, \quad (5)$$

где  $R_{cr}$  – радиус капилляра,  $\Delta p$  – лапласовское капиллярное давление. Поскольку вводимые в жидкий расплав частицы, как правило, плохо смачиваются, знак  $\Delta p$  отрицательный, и необходимо создать большое внешнее давление  $p_{ex}$ , чтобы компенсировать давление Лапласа и позволить металлу проникнуть в частицу. Особенно это важно для наноструктурированных частиц с радиусом пор-капилляров  $R_{cr}$  порядка десятков нанометров. Из анализа выражения (5) легко видеть, что при достаточно малых  $R_{cr}$  и больших  $\theta$  для создания нужной величины  $p_{ex}$ , чтобы результирующее давление было положительным, может потребоваться недостижимая технически мощность ультразвукового воздействия. В этом случае уменьшение угла смачиваемости при электростатической зарядке частиц может привести к снижению требуемой интенсивности ультразвука. Если добиться снижения краевого угла  $\theta$  до величин, меньше  $90^\circ$  градусов, то дополнительных воздействий для введения частиц в расплав не потребуется.

Скорость движения мениска в капилляре определяется выражением:

$$v_{cf} = \frac{R_{cr}^2 p}{8\eta_l l}, \quad (6)$$

При выполнении условия  $p_{ex} > \Delta p$ , пора-капилляр будет заполнена жидким металлом через некоторое время. Величину этого времени получим путем интегрирования уравнения (6):

$$t_{wt} = \frac{4\eta_l l_{cr}^2}{R_{cr}^2 p}. \quad (7)$$

Отношение  $l_{cr}/R_{cr}$ , очевидно, пропорционально диаметру частиц и их удельной поверхности  $S_m$ :

$$\frac{l_{cr}}{R_{cr}} = k S_m D, \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности. Типичные значения данной величины составляют для наночастиц от десятков до нескольких сотен (в соответствии с паспортными данными порошков оксида алюминия, оксида циркония и т.п. [7]).

Таким образом, в работе предложено математическое описание процесса проникновение расплава металла в электростатически заряженные субмикронные частицы и их агломераты под действием ультразвука, с учетом изменения краевого угла смачивания при наличии заряда на поверхности частиц, капиллярных явлений, ультразвуковой кавитации и звукокапиллярного эффекта. Проведенное параметрическое исследование позволяет сделать следующие выводы. Электростатический заряд поверхности позволяет уменьшить краевой угол смачивания, тем сильнее, чем меньше частица. Ультразвуковое воздействие делает возможным пропитку агломератов частиц расплавом металла, и введения в расплав частиц благодаря создаваемому звукокапиллярному эффекту. Время пропитки существенно зависит от значения краевого угла смачивания. Чем меньше краевой угол, тем меньше времени требуется для пропитки частицы с помощью ультразвука. При значении краевого угла смачивания меньше 90 градусов пропитка частиц возможна даже без применения ультразвука, хотя ультразвуковое воздействие ускоряет этот процесс. Получено выражение для критического значения заряда частиц, при превышении которого поверхности частицы становятся смачиваемой металлом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60028 мол\_а\_дк.*

#### Литература

1. S. Vorozhtsov, V. Kolarik, V. Promakhov, I. Zhukov, A. Vorozhtsov & V. Kuchenreuther-Humme. The Influence of Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> Nanoparticles on the Physical and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites at High Temperatures // JOM, 68(5), (2016), P. 1312-1316.
2. Kudryashova Olga, Vorozhtsov Sergey On the Mechanism of Ultrasound-Driven Deagglomeration of Nanoparticle Agglomerates in Aluminum Melt // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM). Vol. 68, No. 5, 2016.
3. Eskin, G. I., Eskin D. G. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts, London-NY, CRC Press, 2014.
4. S. Vorozhtsov, O. Kudryashova, V. Promakhov, V. Dammer & A. Vorozhtsov Theoretical and Experimental Investigations of the Process of Vibration Treatment of Liquid Metals Containing Nanoparticles // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM).
5. P.P. Prokhorenko, N.V. Dezhkunov, G.E. Konovalov, Ultrasonic Capillary Effect, Minsk, Nauka i Tekhnika, 1981.
6. De Gennes P.G. Wetting: Statics and Dynamics//Rev. Mod. Phys, 1985. V. 57. P. 827—863.
7. Rozenberg L. High-intensity ultrasonic fields, NY, Plenum Press, 1971.

# **УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЖИДКОСТНОЙ ДЕСОРБЦИИ В КРУПНОГАБАРИТНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ**

**Арефьева А.Н.<sup>1</sup>, Лебедев Н.М.<sup>1</sup>, Симаков И.Г<sup>1</sup>, Лексин М.Ю.<sup>2</sup>, Копбаева М.П.<sup>2</sup>**

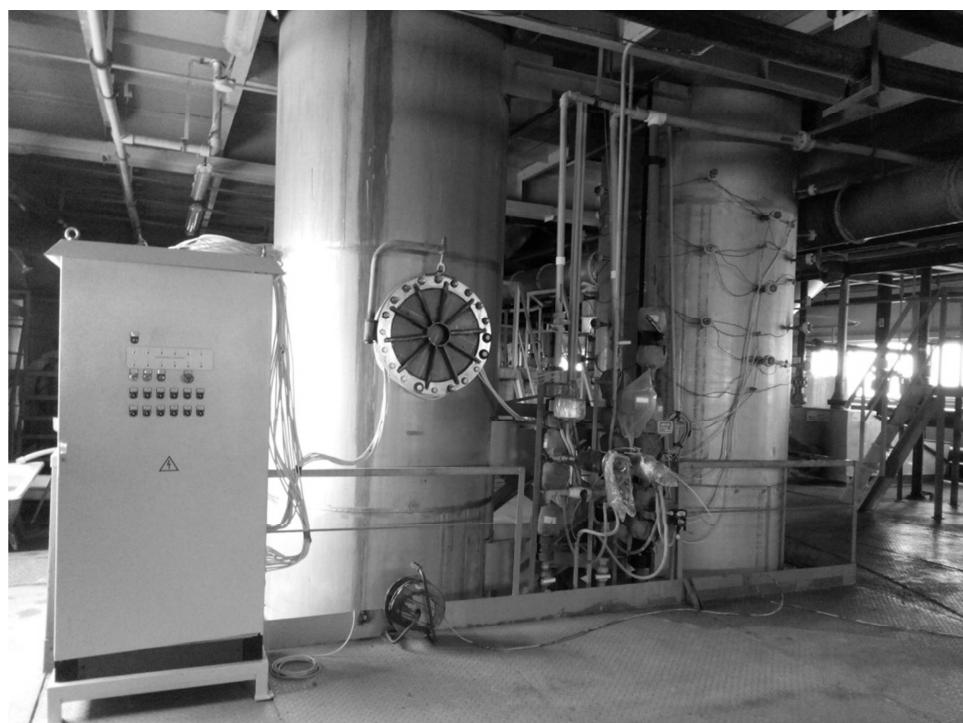
<sup>1</sup>ООО «Александра-Плюс», Вологда mail@alexplus.ru, www.alexplus.ru

<sup>2</sup>ТОО «Институт высоких технологий», Алматы, Казахстан

О способах применения ультразвуковых полей высокой интенсивности в процессах обогащения полезных ископаемых известно давно. Однако промышленные ультразвуковые установки широкого распространения так и не получили. Компания «Александра-Плюс» имеет богатый опыт разработки, изготовления и запуска в производство ультразвукового оборудования различных сфер применения, в том числе ультразвуковое оборудование для предприятий горно-обогатительной промышленности. За годы плодотворной работы компания разработала множество моделей ультразвукового оборудования, описание некоторых представлены на сайте компании ([alexplus.ru](http://alexplus.ru)).

Наиболее интересные результаты интенсификации технологического процесса путем применения ультразвукового оборудования были получены при отработке технологии ультразвукового (УЗ) воздействия на десорбцию урана. Технологическое применение прогрессивных сорбционных процессов часто сдерживается из-за недостаточной ёмкости сорбента и низкой скорости насыщения ионита ценными компонентами, извлекаемыми из раствора. С целью интенсификации процесса десорбции технологическая линия десорбции урана была оснащена комплектом ультразвукового оборудования, что должно сокращать продолжительность насыщения сорбента ценными компонентами извлекаемыми из раствора.

В процессе масштабных испытаний УЗ излучатели устанавливались на колонну при помощи адаптеров привариваемых непосредственно на стенку колонны (рис. 1). Общее количество излучателей - составило 36 шт.



**Рис. 1 - Установленные на колонне в зоне десорбции УЗ излучатели**

В соответствии с программой проведения испытаний на начальной стадии было запущено 6 излучателей с частотой 18 кГц. Через 12 часов дополнительно было подключено еще 6 излучателей. По прошествии 24 часов, генераторы остановили и в соответствии с программой

перешли к испытаниям следующего режима. При проведении испытаний УЗ установка работала непрерывно с отключением в момент перегрузки смолы. Режим работы УЗ установки в период испытаний приведен в таблице 1.

Таблица 1

Режим работы УЗ установки в период испытаний

Режим работы УЗ установки	Время работы установки, час
6 излучателей 18 кГц	10 часов 30 минут
6 излучателей 18 кГц	12 часов
6 излучателей 18 кГц	10 часов
12 излучателей 18 кГц	12 часов
12 излучателей 18 кГц	20 часов
12 излучателей 18 кГц	10 часов
18 излучателей 18 кГц	14 часов
24 излучателей 18 кГц	24 часов
6 излучателей 22 кГц	10 часов 30 минут
12 излучателей 22 кГц	21 часов
12 излучателей 22 кГц	22 часов
12 излучателей 30 кГц	46 часов 30 минут

Для наглядного представления о влиянии ультразвукового воздействия на процесс десорбции представлены графические зависимости изменения содержания урана в десорбате рис. 2, извлечения урана в десорбат рис. 3.

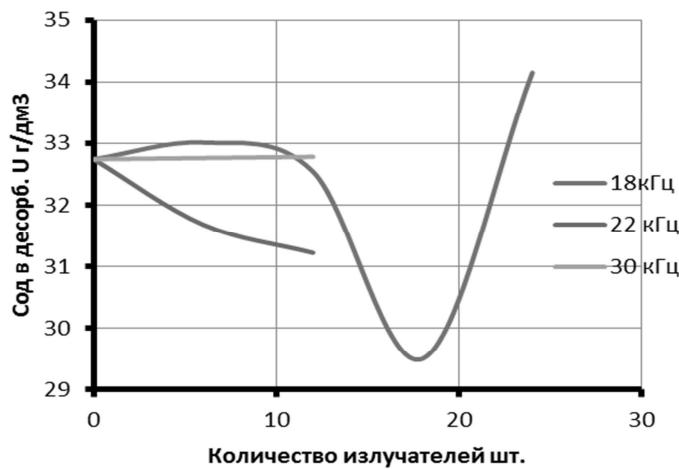


Рис. 2 - Изменение содержания урана в десорбате в зависимости от количества работающих излучателей

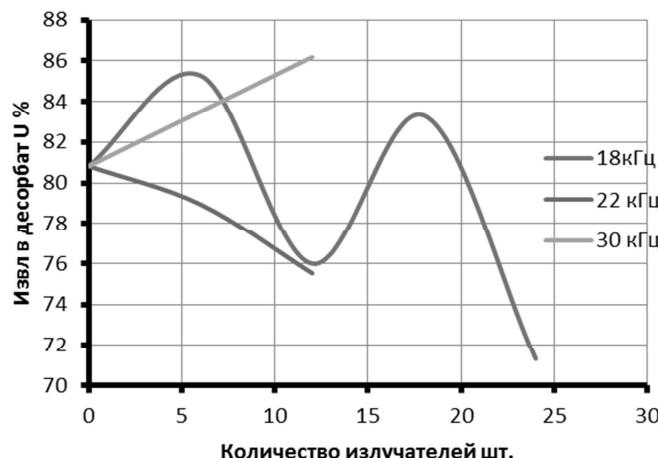


Рис 3 - Изменение извлечения урана в десорбат в зависимости от количества работающих излучателей

Из представленных графических зависимостей видно что, наилучшие показатели по извлечению урана в десорбат и раствор, а также по содержанию урана в десорбате были достигнуты при использовании 12 излучателей, работающих с частотой 30 кГц. Под воздействием кавитации возрастает число не компенсированных молекулярных связей на поверхности сорбента, в том числе и на поверхности стенок капилляров, а так же облегчает проникновение раствора в ранее недоступные микро-капилляры, что не возможно осуществить другими методами. При данном режиме работы УЗ установки среднее извлечение урана в товарный десорбат составило 86,19 % при содержании в нем урана 32,78 г/дм<sup>3</sup>. Среднее количество расходуемой на десорбцию кислоты при этом составило 3,18 м<sup>3</sup>/12 часов против 3,56 м<sup>3</sup>/12 часов при работе колонны без использования УЗ. Применение данного режима позволило повысить извлечение урана в десорбат на 4 - 5 % по сравнению с работой колонн без применения УЗ оборудования. При этом расход кислоты был снижен на 0,4 – 0,6 м<sup>3</sup>/12 часов по сравнению с оборудованием без использования УЗ. Общее извлечение урана в раствор увеличилось на 1,5 % по сравнению с работой колонны без использования УЗ.

Использование 18 излучателей, работающих на частоте 18 кГц, позволило снизить количество подаваемой на десорбцию кислоты с 3,56 м<sup>3</sup>/12 часов до 2,46 м<sup>3</sup>/12 часов по сравнению с работой колонны без использования УЗ. При этом произошло снижение содержания урана в товарном десорбате до 29,5 г/дм<sup>3</sup> при увеличении в него извлечения с 81,95 % при работе колонны без использования УЗ до 83,31 %. Извлечение урана в раствор увеличилось в среднем на 1,65 % по сравнению с работой колонны без использования УЗ. Снижение содержания урана в десорбате при данном режиме работы ультразвуковой установки, возможно, носит временный характер и с увеличением времени работы УЗ установки может увеличиваться. Наблюданное увеличение извлечения урана в десорбат на 1,36 % при сниженном на 30,9 % количестве подаваемой на десорбцию кислоты по сравнению с работой колонны без использования УЗ позволяет сделать вывод об эффективности ультразвукового воздействия непосредственно на процесс десорбции. Внутрикапиллярные процессы интенсифицируются в акустическом поле за счет звукокапиллярного эффекта, связанного с увеличением высоты и скорости подъема жидкости в капиллярах.

При испытаниях различных режимов работы УЗ установки было определено, что максимальное влияние на процесс десорбции оказывает применение 12-18 излучателей, работающих с частотой 18 кГц. При работе установки на данной частоте происходит более полное раскрытие микропор в зернах ионита под действием кавитации, а так же полная очистка их поверхности, что заметно увеличивает сорбционную ёмкость смолы. Использование такой частоты работы УЗ установки требует специального регламента запуска УЗ установки и вывода на рабочий режим колонны. За весь период испытаний УЗ установка проработала 212 часов, общий расход электроэнергии составил 87,86 кВт.

В результате проведенных опытно-промышленных испытаний была подтверждена эффективность применения мощного ультразвука для интенсификации ионообменных процессов. Ультразвуковое оборудование производства компании «Александра-Плюс» обеспечивает достижение аналогичных результатов и в других технологических процессах связанных с воздействием ультразвука на сыпучие материалы, в том числе: оттирка поверхности минералов, удаление поверхностных плёнок; разрушение сростков, интенсивная дезинтеграция минеральных комплексов; обесшламливание, эффективное отделение глинистых частиц и интенсификация процессов отмыки высокоглинистых материалов; классификация материала в пульпе по заданной крупности; сепарация материала по плотности и форме; обработка реагентов с целью интенсификации процессов флотации.

## **АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

Абраменко Д.С.	74
Абрамов А.Д.	86
Абрамов В.О.	12
Андреев В.Г.	33
Арефьева А.Н.	128
Архипов Ю.Е.	36
Барсуков Р.В.	21
Бачурин Д.В.	44
Белоусов Н.Н.	101, 104
Беляев С.П.	122
Беспалов Э.Н.	98
Варюхин В.Н.	101, 104
Вишневская А.Н.	24
Ворожцов А.Б.	125
Ворожцов С.А.	125
Генне Д.В.	27
Голых Р.Н.	27, 30, 56, 80
Гурбатов С.Н.	33
Демин И.Ю.	33
Доровских Р.С.	56
Жиляев А.П.	71, 83, 95
Загидуллина Ю.Р.	83
Зеленев В.М.	113
Ильченко Е.В.	21, 30
Иляхинский А.В.	68
Калмыков А.В.	98
Камалов Ю.Р.	33
Кандалинцев Б.А.	36
Классен Н.В.	18
Клубович В.В.	6, 15, 18

Кобелев Н.П.	18
Кожушко В.В.	107
Колыванов Е.Л.	18
Копбаева М.П.	128
Коптяков А.С.	36
Косников Г.А.	98
Крылова Н.А.	39
Кудряшова О.Б.	125
Кузовников Ю.М.	9
Кулак М.М.	15, 18
Кустов А.И.	110, 113
Ланин В.Л.	62
Ларичев М.Н.	77
Лебедев Н.М.	128
Лексин М.Ю.	128
Лысиков М.В.	116, 119
Макаров С.В.	116, 119
Мигель И.А.	110, 113
Мисоченко А.А.	41
Муллакаев М.С.	12
Мурзаев Р.Т.	44
Мурзинова М.А.	47
Мухаметгалина А.А.	47, 50, 71
Мышляев М.М.	18
Назаров А.А.	3, 44, 47, 50, 71, 83, 95
Неверов А.Н.	53
Некит В.А.	59, 65
Непомнящая В.В.	122
Нестеров В.А.	27, 56, 80
Огарков Н.Н.	59, 65
Петухов И.Б.	62
Платов С.И.	59, 65
Плотников В.А.	116, 119

Покидов А.П.	18
Промахов В.В.	125
Реснина Н.Н.	122
Родюшкин В.М.	68
Рубаник В.В. мл.	89, 122
Рубаник В.В.	6, 41, 71, 89, 122
Рыхтик П.И.	33
Самигуллина А.А.	47, 71, 83, 95
Сафонов Д.В.	33
Сергиенко В.П.	107
Симаков И.Г.	128
Сливин А.Н.	86
Столяров В.В.	41
Суфьянов Д.В.	59
Тимофеев В.Н.	36
Хакимов А.Г.	92
Хина Б.Б.	15
Хмелев В.Н.	9, 21, 27, 30, 56, 74, 80, 86
Хмелев М.В.	9, 27, 86
Царенко Ю.В.	6, 41, 71, 89
Цыганок С.Н.	74
Шайтура Н.С.	77
Шакирьянов М.М.	92
Шакура В.А.	30
Шалунов А.В.	56, 80
Шаяхметова Э.Р.	95
Шеляков А.В.	122
Шестовских А.Е.	36
Эльдарханов А.С.	98
Ярославцев А.В.	65

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

<b>Назаров А.А.</b> УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	3
<b>Рубаник В.В., Клубович В.В., Царенко Ю.В.</b> РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ИНСТИТУТА ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ НАН БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	6
<b>Хмелев В.Н., Кузовников Ю.М., Хмелев М.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	9
<b>Муллакаев М.С., Абрамов В.О.</b> УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ, ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД И ГРУНТОВ.....	12
<b>Клубович В.В., Кулак М.М., Хина Б.Б.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЩНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ В ПРОЦЕССАХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА.....	15
<b>Классен Н.В., Кобелев Н.П., Колыванов Е.Л., Мышиляев М.М., Клубович В.В., Кулак М.М., Покидов А.П.</b> ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВЕРХСТРУКТУР.....	18
<b>Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В.</b> КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ.....	21
<b>Вишневская А.Н.</b> ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СБОРКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	24
<b>Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Нестеров В.А., Генне Д.В., Хмелёв М.В.</b> УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ АБСОРБЦИИ ГАЗОВ.....	27
<b>Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Шакура В.А., Ильченко Е.В.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАКРОМОЛЕКУЛ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	30
<b>Демин И.Ю., Гурбатов С.Н., Рыхтик П.И., Сафонов Д.В., Андреев В.Г., Камалов Ю.Р.</b> АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА VERASONICS С ОТКРЫТОЙ АРХИТЕКТУРОЙ: ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	33
<b>Шестовских А.Е., Архипов Ю.Е., Кандалинцев Б.А., Коптяков А.С., Тимофеев В.Н.</b> СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ АМПЛИТУДЫ СМЕЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ТОРЦА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ.....	36

<b>Крылова Н.А.</b>	
ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ.....	39
<b>Мисоченко А.А., Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Столяров В.В.</b>	
КОМБИНАЦИЯ ЭФФЕКТОВ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА И УЛЬТРАЗВУКА В СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ.....	41
<b>Мурзаев Р.Т., Назаров А.А., Бачурин Д.В.</b>	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ В ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ НЕРАВНОВЕСНЫХ ГРАНИЦ ЗЕРЕН.....	44
<b>Мухаметгалина А.А., Самигуллина А.А., Назаров А.А., Мурзинова М.А.</b>	
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ6, ПОДВЕРГНУТОГО РАВНОКАНАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ ПРЕССОВАНИЮ.....	47
<b>Мухаметгалина А.А., Назаров А.А.</b>	
РАСЧЕТ ДВУХАМПУЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЛНОВОДА.....	50
<b>Неверов А.Н.</b>	
РАЗБОРКА РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	53
<b>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Доровских Р.С., Нестеров В.А., Голых Р.Н.</b>	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ.....	56
<b>Огарков Н.Н., Платов С.И., Суфьяннов Д.В., Некит В.А.</b>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ С ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ НАЛОЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОЛОСУ В ИЗГИБНО- РАСТЯЖНОМ ОКАЛИНОЛОМАТЕЛЕ.....	59
<b>Петухов И.Б., Ланин В.Л.</b>	
ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ МЕДНОЙ МИКРОПРОВОЛОКИ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ...	62
<b>Платов С.И., Огарков Н.Н., Ярославцев А.В., Некит В.А.</b>	
ПРОЦЕСС УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОВКИ.....	65
<b>Иляхинский А.В., Родюшкин В.М.</b>	
О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТАЛЛА ПО АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ УПРУГИХ ВОЛН.....	68
<b>Самигуллина А.А., Мухаметгалина А.А., Жиляев А.А., Назаров А.А., Рубаник В.В., Царенко Ю.В.</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОМ НА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТУЮ СТРУКТУРУ НИКЕЛЯ.....	71

<i>Абраменко Д.С., Цыганок С.Н., Хмелев В.Н.</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	74
<i>Шайтура Н.С., Ларичев М.Н.</i>	
ИЗУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ ЖИДКОЙ ВОДОЙ.....	77
<i>Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Голых Р.Н., Нестеров В.А.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ...	80
<i>Загидуллина Ю.Р., Самигуллина А.А., Жиляев А.П., Назаров А.А.</i>	
ВЫБОР УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ.....	83
<i>Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Абрамов А.Д., Хмелёв М.В.</i>	
АППАРАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ....	86
<i>Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Рубаник В.В. мл.</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА УПРОЧНЕННОГО НИКЕЛИДА ТИТАНА.....	89
<i>Хакимов А.Г., Шакирьянов М.М.</i>	
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРУБОПРОВОДА СО СКОЛЬЗЯЩЕЙ ОПОРОЙ В СПЛОШНОЙ СРЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ...	92
<i>Самигуллина А.А., Шаяхметова Э.Р., Жиляев А.А., Назаров А.А.</i>	
РЕЛАКСАЦИЯ СТРУКТУРЫ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОКО НИКЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ.....	95
<i>Косников Г.А., Эльдарханов А.С., Калмыков А.В., Беспалов Э.Н.</i>	
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА СИЛУМИНОВ И СУСПЕНЗИЙ НА ИХ ОСНОВЕ....	98
<i>Белоусов Н.Н., Варюхин В. Н.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛОКОН И МАТРИЦЫ В ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ....	101
<i>Белоусов Н.Н., Варюхин В. Н.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ IN SITU ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	104
<i>Кожушко В.В., Сергиенко В.П.</i>	
ЛАЗЕРНЫЙ УЛЬТРАЗВУК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЕЙ МЕТАЛЛОВ.....	107
<i>Кустов А.И., Мигель И.А.</i>	
КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ АМД-МЕТОДОВ.....	110
<i>Кустов А.И., Зеленев В.М., Мигель И.А.</i>	
РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АМД-МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	113

<b>Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В.</b>	
БОЛЬШИЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В АЛЮМИНИИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ.....	116
<b>Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В.</b>	
ДЕФОРМАЦИОННЫЙ СТРУКТУРНЫЙ ПЕРЕХОД В АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ.....	119
<b>Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник В.В. мл. Шеляков А.В., Непомнящая В.В.</b>	
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕХАНОАКТИВАЦИИ НА КИНЕТИКУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ СПЛАВА Ti-Hf-Ni-Cu.....	122
<b>Промахов В.В., Кудряшова О.Б., Ворожцов С.А., Ворожцов А.Б.</b>	
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ЧАСТИЦ НА ПРОЦЕСС ИХ ВВЕДЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ РАСПЛАВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА.....	125
<b>Арефьева А.Н., Лебедев Н.М., Симаков И.Г, Лексин М.Ю., Копбаева М.П.</b>	
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЖИДКОСТНОЙ ДЕСОРБЦИИ В КРУПНОГАБАРИТНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	128
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	131

*Научное издание*

**УЛЬРАЗВУК:  
ПРОБЛЕМЫ, РАЗРАБОТКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

*Материалы  
международной научной конференции  
(г. Уфа, Россия, 25 – 29 сентября 2017 г.)*

*Материалы публикуются с предоставленных авторами оригиналов*

*Лицензия на издательскую деятельность  
ЛР № 021319 от 05.01.99 г.*

Подписано в печать 31.08.2017 г. Формат 62x90/8.

Усл. печ. л. 17,83. Уч.-изд. л. 8,28.

Тираж 60 экз. Изд. № 137. Заказ № 6153.

Цена договорная.

*Редакционно-издательский центр  
Башкирского государственного университета  
450076, РБ, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32.*

*Отпечатано АО «Омская картографическая фабрика»  
644070, г. Омск, ул. Куйбышева, 32.  
Тел./факс: (3812) 66-51-72*