Техническая акустика:

разработки, проблемы, перспективы

Материалы международной научной конференции 29-31 марта 2023 года



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА: РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы IV международной научной конференции

(Витебск, 29-31 марта 2023 года)

Минск УП «ИВЦ Минфина» 2023 Под редакцией члена-корреспондента НАН Беларуси В.В.Рубаника

Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы Т38 IV международной научной конференции, Витебск, 29-31 марта 2023 г./ под. ред. Рубаника В.В. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – 182 с.

ISBN 978-985-880-312-4

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

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

Материалы докладов печатаются в виде, представленном авторами.

УДК 534.8:62(082) ББК 32.87я43

ISBN 978-985-880-312-4

© Институт технической акустики НАН Беларуси, 2023

КЛУБОВИЧ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

(к 90-летию со дня рождения)



26 марта 2023 года исполнилось 90 лет Владимиру Владимировичу Клубовичу – известному ученому в области ультразвуковой обработки материалов, академику НАН Беларуси, доктору технических наук, профессору, лауреату Государственной премии БССР, заслуженному деятелю науки Республики Беларусь.

В.В. Клубович родился в д. Вороничи Зельвенского района Гродненской области в крестьянской семье, там же пошел в школу и закончил 4 класса. С 5 по 10 класс учился в средней школе, г.п. Зельва, которую окончил в 1951 году. В этом же году В.В. Клубович поступил в Белорусский государственный университет на физикоматематический факультет, отделение физики, который окончил в 1956 г. В 1956-1957 г.г. работал преподавателем средней школы в г.п. Юратишки Гродненской области.

С 1957 г. В.В. Клубович работал в Физико-техническом институте АН БССР младшим научным сотрудником, старшим инженером-конструктором, главным инженером лаборатории. В 1961 г. окончил аспирантуру при Физико-техническом институте АН БССР и в мае 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование процесса пластической деформации с наложением ультразвука». С 1964 г. по январь 1975 г. В.В. Клубович - старший научный сотрудник лаборатории пластичности Физико-технического института АН БССР.

В мае 1973 г. В.В. Клубович защитил докторскую диссертацию на тему «Основы теории и технологии волочения металлов и сплавов с наложением ультразвука». В январе 1975 г. был избран заведующим лабораторией ультразвука Физикотехнического института АН БССР.

С ноября 1975 г. являлся заместителем директора Института физики твердого тела и полупроводников - директором Витебского отделения Института физики твердого тела и полупроводников АН БССР. В начале 1976 г. Клубович В.В. становится организатором и руководителем нового академического учреждения – Витебского отделения ИФТТП АН БССР, а затем с 1994 по 2002 г. – директором Института технической акустики. В этот период научной деятельности В.В. Клубович стал организатором новых направлений. Под его непосредственным руководством проведены фундаментальные исследования по влиянию ультразвука на физикомеханические свойства металлов и сплавов. Разработаны И внедрены технологические процессы обработки металлических и полимерных материалов при

ультразвуковом воздействии, заложены научные основы использования ультразвука для управления процессом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, практического использования ионно-плазменного нанесения защитных декоративных покрытий, применения ультразвука в медицине и биотехнологии. С 2002 г. по 2017 г. В.В. Клубович работал главным научным сотрудником Института технической акустики, осуществляя научное руководство исследованиями в области ультразвуковых технологий обработки материалов. В настоящее время В.В. Клубович – главный научный сотрудник Физико-технического института НАН Беларуси.

В.В. Клубович – крупный специалист в области ультразвуковой обработки металлов и сплавов. Хорошо известны его работы по теоретическому И экспериментальному исследованию влияния ультразвука на физико-механические свойства твердых тел в зависимости от интенсивности ультразвуковых колебаний и величины статической нагрузки. Им впервые теоретически рассчитаны акустически замкнутые системы для обработки материалов, создана теория упругопластического деформирования материалов при воздействии ультразвука. Проведен теоретический анализ процессов пластического деформирования металлов с применением мощных ультразвуковых колебаний, в основу которого положены кинематические особенности осуществления способов пластического формоизменения металлов с применением ультразвука. Это позволило аналитически определить контактные напряжения при различных схемах подведения энергии колебаний к очагу деформации, получить выражения для расчета энергосиловых параметров процесса, оценить степень влияния на обрабатываемый материал основных факторов ультразвукового воздействия.

В.В. Клубович существенно расширил сферу практических применений ультразвука, предложил ряд новых эффективных процессов получения и обработки материалов под действием ультразвука, в том числе, формирования режущей кромки хирургических скальпелей и других режущих инструментов, сварки пластмассовых изделий, упрочнения и очистки поверхностей различных типов деталей.

В.В. Клубовичу свойственно умелое сочетание глубоких теоретических исследований и решение важных практических задач. Целый ряд разработок, выполненных при непосредственном участии и под его руководством, внедрены на предприятиях Беларуси и стран СНГ, что дало значительный экономический эффект. За разработку научных основ использования мощного ультразвука в механических процессах обработки материалов в 1984 г. B.B. Клубовичу присуждена Государственная премия БССР. За особые заслуги В.В. Клубович отмечен Государственной премией БССР, орденом «Знак Почета», двумя медалями, двумя Почетными грамотами Верховного Совета БССР, Почетными грамотами Совета Министров Республики Беларусь, Почетной грамотой Витебского областного Совета народных депутатов и др.

Научная деятельность В.В. Клубовича заслужила международное признание. Он избран членом Американского института «Ультразвук в медицине», членом Европейского сонохимического общества, членом Европейского физического общества.

На протяжении всего периода научной деятельности В.В. Клубович вносит достойный вклад в развитие науки. Им опубликовано более 600 научных работ, в том числе 17 монографий, одна из которых переведена на английский язык и издана в США, получено более 200 авторских свидетельств и патентов на изобретения. В 1977 г. В.В. Клубович избран член-корреспондентом, а в 1996 г. – академиком АН БССР. Им подготовлено 6 докторов и более 30 кандидатов наук.

Академика В.В. Клубовича отличают высокая научная компетентность, глубокие научные знания и опыт, трудолюбие, целеустремленность.

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Вьюгинова А.А., Новик А.А., Новик А.А.

ООО «ИНЛАБ – Ультразвук», Санкт-Петербург, РФ, inlab@utinlab.ru

Компания ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» самостоятельно разрабатывает и выпускает широчайший спектр ультразвукового технологического оборудования для реализации самых разнообразных ультразвуковых технологий в лабораторном и промышленном масштабе. Это и оборудование для ультразвуковой обработки жидкостей в кавитационном и докавитационном режиме, позволяющее реализовывать ультразвуковое диспергирование, эмульгирование, лизис, экстракцию, гомогенизацию, дегазацию, очистку и др.; оборудование для ультразвуковой сварки пластмасс и металлов, ультразвуковой пайки и лужения, ультразвуковой резки пищевых и непищевых продуктов, безабразивной ультразвуковой финишной обработки и многих других технологий [1].

В последнее время все более актуальной становится задача времени импортозамещения существующего последнего широко И до ультразвукового оборудования распространенного западного производства. Оборудование производства ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» не уступает западным аналогам, а по некоторым параметрам и возможностям их превосходит. В данной статье представлен краткий обзор существующих возможностей импортозамещения.

Первое востребованное направление – это ультразвуковая сварка пластмасс (полимерных, термопластичных, нетканых материалов) в прессовом и непрерывном режиме. Для решения таких задач существуют разработки высокоэффективных ультразвуковых генераторов и преобразователей, специализированных ультразвуковых волноводов (рис. 1) с рабочей частотой от 20 до 70 кГц, которые могут полностью заменить ультразвуковые системы для сварки полимерных материалов производства Telsonic (Швейцария), Dukane (США), Herrmann Ultraschall (Германия), Rinco Ultrasonics (Швейцария) [2].



Рисунок 1 – Оборудование ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» для ультразвуковой сварки термопластичных материалов

Следующее направление – это ультразвуковая резка пищевых и непищевых продуктов, в том числе, резка сотовых панелей из алюминия и кевлара (арамида) [3]. В западных странах такое оборудование выпускается такими компаниями как Telsonic (Швейцария), Emerson-Branson (США), Herrmann Ultraschall (Германия), для резки сотовых панелей – такими как Creno Industry (США), Soniblade (Швейцария), Dukane (США). Импортозамещающие разработки в этом направлении приведены на рис. 2, они включают системы с рабочей частотой от 20 до 50 кГц, треугольные и дисковые ультразвуковые ножи, ножи и системы для автоматизированной и полуавтоматической нарезки пищевых продуктов, резины и т.п. с шириной реза до 315 мм.



Рисунок 2 – Оборудование ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» для ультразвуковой резки пищевых, непищевых продуктов и сотовых панелей

Еще одно направление – это ультразвуковая обработка жидких сред (диспергирование, эмульгирование, лизис, экстракция, гомогенизация и т.п.), широко представленное немецкой компанией Hielscher Ultrasonics и рядом менее крупных организаций. В этой области имеются собственные разработки в области лабораторного и промышленного оборудования, примеры которого представлены на рис. 3. Варианты исполнения таких систем самые разнообразные: погружные и проточные с различной производительностью, с одной или несколькими рабочими частотами, оснащенные программируемым контроллером или автоматической системой управления [4].



Рисунок 3 – Лабораторное и промышленное оборудование ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» для обработки жидких сред

Импортозамещающие разработки также востребованы для реализации технологий ультразвуковой сварки и ультразвуковой пайки металлических изделий [5]. Для их осуществления ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» разрабатывает и производит стандартное и специализированное оборудование, которое способно заменить аналогичное оборудование компаний Telsonic (Швейцария), Emerson-Branson (США), Herrmann Ultraschall (Германия), Kuroda Techno Co (Япония), Japan Unix (Япония), S-Bond Technologies (США). Особенностью оборудования для сварки металлических (проводов, контактов, фольги) изделий ШИН, является применение высокоэффективных магнитострикционных преобразователей, которые обеспечивают стабильность работы системы при механических нагрузках. Особенность **VЛЬТРАЗВУКОВЫХ** паяльников применение биметаллических волноводов-жал, _ конструкция которых удовлетворяет требованиям с точки зрения акустики и с точки зрения теплопроводности.



Рисунок 4 – Ультразвуковая ванна лужения, ультразвуковой паяльник и ультразвуковая сварочная машина для сварки металлов производства ООО «ИНЛАБ – Ультразвук»

ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» также выпускает оборудование для безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) металлов (ультразвуковая упрочняющечистовая обработка, поверхностно-пластическое деформирование), результатом которой является уменьшение шероховатости и повышение твердости (микротвердости) поверхности металла, снижение износа – оборудование такого типа, в частности, выпускается компанией Hiqusa (Япония), и разрабатывает оборудование для ультразвуковой дробеструйной обработки, которое в данный момент выпускается такими западными компаниями как Sonats (Франция), Тоуо Seiko (Япония).

Оборудование ООО «ИНЛАБ – Ультразвук» соответствует самым современным требованиям, отвечает существующим потребностям импортозамещения и по ряду параметров превосходит западные аналоги. Кроме того. на собственной конструкторской и производственной базе предприятие реализует уникальные приоритетом предприятия является непрерывное проекты. И развитие И совершенствование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвуковое технологическое оборудование [Электронный ресурс] // URL: http://utinlab.ru (Дата обращения: 25.01.2023)

2. Ультразвуковое технологическое оборудование [Электронный ресурс] // URL: ультразвуковое-оборудование.рф (Дата обращения: 25.01.2023)

3. Vjuginova A., Durukan Y., Vjuginov S., Novik A. Jr. Design and simulation of ultrasonic triangular blades for honeycomb structures cutting // 2021 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, Saint-Petersburg.

4. Вьюгинова А. А. Лбов А.А., Новик А.А., Новик А.А. Разработка методики ультразвукового процессирования химически агрессивных сред при повышенных температурах и давлении и соответствующего ультразвукового технологического оборудования // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020, №3, с. 12-17. 5. Вьюгинова А.А., Новик А.А., Вьюгинов С.Н., Лбов А.А., Новик А.А..

5. Вьюгинова А.А., Новик А.А., Вьюгинов С.Н., Лбов А.А., Новик А.А., Ультразвуковое оборудование для реализации технологий сварки и пайки металлических изделий // «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы»: материалы международной научной конференции, Витебск, 25–28 мая 2021 г.

ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Полунин А.В., Растегаев И.А., Шафеев М.Р., Мерсон Д.Л., Криштал М.М. Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия, e-mail: RastlgAev@yandex.ru

Известно, что оксидные покрытия, получаемые по технологии плазменноэлектролитического оксидирования (ПЭО) позволяются придать поверхности металлов вентильной группы (Al, Mg, Ti и др.) и их сплавов уникальные эксплуатационные свойства, а именно: износостойкость, теплостойкость, коррозионную стойкость, диэлектрические свойства. Однако, поскольку процесс ПЭО проводится в ёмкости с электролитом при высоком напряжении, то контроль качества формирующегося покрытия непосредственно во время его нанесения весьма затруднен. Поэтому режимы ПЭО сегодня подбираются эмпирически и требуются разработка средств, позволяющих обнаруживать отклонения непосредственно во время формирования покрытий.

Поскольку процесс ПЭО диссипативный, то многие процессы, протекающие при формировании оксидного покрытия, излучают акустические волны в звуковом и ультразвуковом диапазонах. Акустические сигналы присутствуют на всех стадиях (этапах) ПЭО, поэтому имеется принципиальная возможность по ним обнаружить отклонение от технологии оксидирования и тем самым прогнозировать итоговое качество получаемого покрытия или скорректировать процесс его формирования. Однако предварительно необходимо изучить характеристики и особенности акустических сигналов, возникающих на различных режимах ПЭО, что и являлось целью настоящей работы. При этом из-за низкой помехозащищенности измерений в звуковом диапазоне в работе исследовались характеристики сигналов только ультразвукового диапазона (от 20 до 800 кГц).

Исследования проводились на образцах деформируемого Al-Mg сплава 1560 (химический состав, wt%: 6,2 Mg; 0,65 Mn; 0,5 Ti; 0,4 Si; 0,3 Fe; 0,18 Zn; 0,087 Cu; Al основа) при 125 вариантах (режимах) ПЭО, которые отличались: длительностью воздействия (60; 90; 120; 150 и 180 минут); величиной плотности тока (J = 6; 9; 12; 15 и 18 А/дм²) и соотношением величин токов в катодном и анодном полупериодах (С/А = 0,7; 0,85; 1,0; 1,15 и 1,3). На всех вариантах ПЭО фиксированными являлись: частота тока (500 Гц); коэффициент заполнения периода импульсов технологического тока (65%); соотношение длительностей катодного и анодного формовочных импульсов (55%) и паузы между катодным и анодным импульсом (50%). Электролит представлял собой водный раствор дистиллированной воды с добавлением КОН (3 г/л), Na₄P₂O₇×10H₂O (8 г/л) и Na₂SiO₃×5H₂O (12 г/л), температура которого поддерживалась на уровне 285±3 К. Ультразвуковые сигналы при ПЭО регистрировалась через акустически непосредственно эпоксидную прозрачную среду С образца пьезоэлектрическим преобразователем П111-(0,02-0,3) (Россия), которые далее усиливались 2-х каскадным широкополосным фильтр-усилителем MSAE-FA010 (Россия), затем оцифровывались и записывались кадрами длительностью 40 мс (20 полных циклов воздействия) через 2 минуты с помощью 12-ти битной платы аналогоцифрового преобразования (АЦП) Advantech PCI-1714 (Тайвань) при частоте дискретизации 2 МГц. Синхронно с акустическими сигналами записывались кадры изменения напряжения и тока за цикл ПЭО.

Общий характер изменения энергетических параметров во временной и частотной (в диапазоне 20 кГц – 1 МГц) области по времени записи представлен на рисунке 1, где римскими цифрами обозначены следующие основные стадии ПЭО: I - анодирование и начало развития анодного «искрения», которое визуально сопровождается общим свечением образца; II - ПЭО с преимущественно анодными

микродуговыми разрядами, при котором визуально наблюдаются равномерные и сливающиеся микровспышки белого или бело-голубого цвета на общем темном фоне образца; III - ПЭО переходного (смешанного) режима с возникновением микродуговых разрядов в анодном и катодном полупериодах, при котором наблюдается схожая визуальная картина со стадией II, но микровспышки более редкие и мощные (яркие), а также с началом смещения их цвета к бело-желтому оттенку; IV - ПЭО, преимущественно, с катодной полярностью с образованием локальных дуговых разрядов, визуально представляющая собой «мягкое свечение» изнутри образца, преимущественно желтого или желтовато-красного оттенка.



Рисунок 1 – Амплитудные (а) и частотные (б) особенности изменения акустических сигналов в зависимости от режима ПЭО при длительности оксидирования 180 минут (обозначение стадийности и управляющих параметров ПЭО расшифрованы в тексте, спектрограммы (б) получены методом STFT, где: 28 дБ <

Из рисунка 1 видно, что каждая стадия ПЭО во временной и частотной области имеет «свой» характерный вид. Для более детального исследования особенности проявления акустических сигналов в амплитудной и частотной областях на каждой стадии ПЭО был рассмотрен вид сигналов по циклам воздействия (рисунок 2, где в амплитудной области параллельно сигналам наложены кривые изменения напряжения). Установлено, что стадия I характеризуется сигналами непрерывного вида (большим количеством импульсных сигналов сопоставимой амплитуды) в анодной части цикла воздействия и практически отсутствуют сигналы в его катодной

части. На стадии II на фоне сигналов непрерывного вида в анодной части появляются более высокоамплитудные различимые импульсные сигналы, а также появляются сигналы в катодной части цикла. На стадии III также присутствуют акустические сигналы в анодной и катодной части цикла, но на анодном полупериоде преимущественно сигналы импульсного вида. На стадии IV практически исчезают сигналы в анодном полупериоде воздействия (становятся низкоамплитудными) и наблюдаются после появления мощных сигналов в катодном полупериоде. Однако в любом случае со временем частота следования сигналов заметно уменьшается, т.е. акустическое излучение происходит не в каждом цикле воздействия. Данные изменения находят соответствующее отражение и в частотной области (рисунок 1 и 2). Таким образом, полученные результаты показывают возможность использования параметров сигналов ультразвукового диапазона для мониторинга и контроля режима ПЭО, как минимум для управляемого перехода на оптимальный режим и его поддержания, либо своевременной остановке ПЭО без перехода в область разрушающих дуговых разрядов.



Рисунок 2 – Общий вид акустических сигналов во временной и спектральной области по циклам воздействия (б÷л) за время ПЭО, где: длина кадров (б÷л) равна 2 мс; принятые обозначения, как на рисунке 1; амплитуда и время на (а) представлена в отсчетах АЦП (smpl)

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10262) и Государственного задания (проект FEMR-2023-0003).

НОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫСВОБОЖДЕНИЯ АНТИБИОТИКОВ

Критченков А.С.^{1,2}, Егоров А.Р.², Хубиев О.М.², Голубев Р.А.¹ ¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь ²Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия platinist@mail.ru

По данным ВОЗ инфекционные заболевания до сих пор являются одной из важнейших причин смертности и/или инвалидизации населения [1]. Этиотропная терапия бактериальных инфекционных заболеваний направлена главным образом на инфекционных агентов. большого уничтожение Среди разнообразия антибактериальных средств чрезвычайно эффективны антибиотики фторхинолонового ряда, зачастую являющиеся единственным лекарственным средством, способным спасти жизнь пациента [2]. Важной проблемой при назначении и применении препаратов фторхинолонового ряда, как и других антибиотиков, является их системная токсичность [3] и достаточно быстрая элиминация. Эти проблемы могут быть решены конъюгацией лекарственного средства с полимерной матрицей или инкапсуляцией в микро- или наночастицы. Кроме того, ранее нами было показано, что конъюгация антибактериального соединения с полимерной матрицей может значительно снизить его токсичность без снижения антибактериального эффекта [4].

Среди различных полимеров, используемых для конъюгации антибактериальных препаратов, полисахариды занимают особое место ввиду их биосовместимости, биоразлагаемости, отсутствия канцерогенности, иммуногенности и аллергенных свойств Среди полисахаридов наибольшими преимуществами характеризуется хитозан, поскольку он содержит первичную аминогруппу, что обеспечивает удобство и легкость химической модификации. Кроме того, сам хитозан обладает антибактериальным эффектом.

В литературе описаны наночастицы хитозана или его производных, содержащие фторхинолоны, полученные методом ионного гелеобразования. Однако конъюгаты фторхинолонов с хитозаном не описаны. Кроме того, в литературе не описаны амфифильные самособирающиеся наночастицы, нагруженные фторхинолоном, а такие системы также представляют несомненный интерес для адресной доставки лекарств и контролируемого высвобождения антибиотиков.

В рамках данной работы (см. рис. 1) мы предположили, что введение в полимерную цепь хитозана достаточно гидрофобного фторхинолона (т.е. ципрофлоксацина) может приводить к образованию конъюгатов фторхинолона (1). способных к самосборке в амфифильные наночастицы (2); и эти наночастицы 2 могут быть дополнительно загружены фторхинолоном (3). Конъюгаты типа (1), не способные к самосборке, могут быть преобразованы в наночастицы, нагруженные фторхинолоном (4), путем ионного гелеобразования. Кроме того, ставилась цель получить конъюгаты фторхинолонов, в которых фторхинолон связан с хитозаном через pH-чувствительный спейсер (5), предполагая, что такие системы способны высвобождать фторхинолон при слегка подкисленных значениях рН, характерных для воспалительного процесса бактериальной этиологии. Конъюгаты со спейсером (5) также могут быть дополнительно преобразованы в загруженные фторхинолонами наночастицы путем ионного гелеобразования (6).

Введение фторхинолона в полимерную цепь было осуществлено с помощью электрохимических методов.



Рисунок 1 – Общая стратегия синтеза антибактериальных систем на основе фторхинолонов

На основании профиля высвобождения полученных систем было запланировано определить лидирующую систему на основе фторхинолонов и изучить ее антибактериальный эффект как *in vitro*, так и *in vivo*. Следует отметить, что описанные в литературе системы на основе фторхинолонов и хитозана исследовались только *in vitro*. Результаты реализации описанной гипотезы будут подробно обсуждены в докладе.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 22-23-00044).

ЛИТЕРАТУРА

1. Front Matter, in: A.R. Rees (Ed.), A New History of Vaccines for Infectious Diseases, Academic Press, Cambridge, 2022, p. iii.

2. M.L. Grayson, S. Cosgrove, S.M. Crowe, J.S. McCarthy, W. Hope, J. Mills, J.W. Mouton, D.L. Paterson, Principles of antimicrobial use, in: M.L. Grayson, S.E. Cosgrove, S. Crowe, W. Hope, J.S. McCarthy, J.M., J.W. Mouton, D.L. Paterson (Eds.), Kucers the Use of Antibiotics, CRC Press, Boca Raton, 2017.

3. A.K. Khaleel, R.B. Shaari, M.A.A. Nawi, A.M.H. Al-Yassiri, Toxicological Aspects of Fluoroquinolones Administration: A Literature Review, Egypt. J. Chem. 65(5) (2022) 561-569.

4. A.S. Kritchenkov, N.V. Zhaliazniak, A.R. Egorov, N.N. Lobanov, O.V. Volkova, L.A. Zabodalova, E.P. Suchkova, A.V. Kurliuk, T.V. Shakola, V.V. Rubanik, V.V. Rubanik, N.Z. Yagafarov, A.S. Khomik, V.N. Khrustalev, Chitosan derivatives and their based nanoparticles: ultrasonic approach to the synthesis, antimicrobial and transfection properties, Carbohydr. Polym. 242 (2020) 116478.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛИ ИЗМЕРЕНИЕМ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ

Пантелеенко Ф.И., Сидоров В.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: va_sidorov@tut.by

Для оценки остаточного ресурса работоспособности и пригодности для дальнейшей эксплуатации ответственных металлических конструкций самого различного назначения широко используются разрушающие и неразрушающие методы контроля. При этом одним из видов контрольных испытаний является измерение твердости в зонах максимальных силовых и тепловых нагрузок контролируемых конструкций. В настоящей работе предлагается алгоритм теоретической оценки характеристик прочности и пластичности металла контролируемых зон только по результатам измерения твердости по Бринеллю.

Твердость сталей при их деформировании от состояния поставки вплоть до разрушения возрастает, а значения пластичности и ударной вязкости уменьшаются. При этом максимальная твердость имеет место на поверхности разрушения. Поэтому для каждой конкретной плавки стали существует шкала твердости, с максимальным значением ее в состоянии поставки и максимальным на поверхности разрушения.

Для получения расчетных формул прочности, пластичности и ударной вязкости металла контролируемых зон связывают значения его сертификатных характеристик с результатами измерений твердости. На рисунке 1 представлен алгоритм оценки состояния конструкции измерением твердости по Бринеллю, включающий четыре этапа.

Накопленный уровень пластической деформации в локально деформированной зоне определяют по формулам:

$$\psi_{np} = \ln \frac{HB_{\kappa}}{HB_0} = \ln \frac{h_0}{h_{\kappa}}, \qquad \varepsilon_{np} = \ln \frac{d_0}{d_{\kappa}}$$
(1)

где: *HB*_к - значение твердости, полученной при контроле; *d*_o , *d*_k , *h*_o , *h*_k диаметр и глубина отпечатка при измерении твердости для состояния поставки и контроля соответственно;

Если известны уровни накопленной пластической деформации \mathcal{E}_{np} и Ψ_{np} , то запас оставшейся пластичности составит:

$$\varepsilon_{OC} = \varepsilon - \varepsilon_{np} \,. \tag{2}$$

$$\psi_{OC} = \psi - \psi_{\rm np} \,. \tag{3}$$

Экспериментальные исследования на растяжение стандартных образцов из малоуглеродистой и низколегированной сталей показывают, что при достижении остаточной пластической деформации значения порядка ε_{oc} = 0,19 - 0,20 и ψ_{oc} ≥ 0,4 равномерное удлинение образца заканчивается и начинается процесс образования шейки.



Рисунок 1 – Алгоритм оценки остаточной пластичности

В реальных же конструкциях такое значение остаточной деформации соответствует возникновению пор и внутренних микро-и макротрещин, которые под действием рабочих нагрузок увеличиваются и в результате становятся сквозными. В этом состоянии размер внутренних дефектов можно определить другими неразрушающими методами контроля, а по выявленным размерам трещин оценить состояние локально деформированных зон конструкций по законам линейной механики разрушения, особенно для конструкций, работающих в условиях усталостного режима.

При применения изложенного алгоритма оценки состояния конструкций для измерения твердости их локально деформированных зон целесообразно применять портативные твердомеры. Из серии портативных твердомеров, применяемых для измерения твердости изделий из любых металлических материалов наиболее удобен в применении твердомер ультразвуковой ТКМ 459С «универсальный», позволяющий использовать два метода твердометрии. Прибор обладает широким диапазоном применения, позволяет производить измерение твердости на изделиях с плоскими, цилиндрическими и сферическими поверхностями в производственных и полевых условиях в любом пространственном положении исследуемой поверхности. Прибор позволяет выявлять изменение твердости для точек, расположенных на расстоянии 1-2 мм друг от друга, что дает возможность выявлять локально деформированные зоны металла с пиковой формой изменения твердости, а из таких зон, как правило, возникают и распространяются трещины.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ УЗ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПОКРЫТИЙ

Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Цыганок С.Н., Казанцев И.В.

Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия, roman@bti.secna.ru

В статье приводятся результаты исследований, направленных на выявление возможности использования в качестве датчика контроля степени кавитационной рабочих инструментов И защитных эрозии материалов покрытий [1-7] пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), применяемых для формирования кавитационного воздействия в жидких средах. На основе анализа электрических эквивалентных схем пьезоэлектрических УЗКС (излучателей) были зависимости электрических параметров УЗКС выявлены (импеданс Z, его действительная Re и мнимая Im составляющие) от степени кавитационного износа тестового образца, являющегося частью конструкции УЗКС, а также от величины жидкостного зазора между излучающей поверхностью и разрушаемым кавитацией покрытием.

Для выявления возможностей контроля было исследовано влияние конструктивных особенностей УЗКС, отличающихся количеством волноводов с различными коэффициентами трансформации и площадями акустического контакта с озвучиваемой жидкой средой.

Установлено, что мнимая часть импеданса УЗКС Im является наиболее чувствительным параметром УЗКС к степени кавитационного износа образца.

Зависимость от нее величины кавитационного разрушения цилиндрического инструмента (наконечника) ΔL для различных вариантов сборки УЗКС при длине тестового образца, равной половине длины волны на частоте УЗКС и коэффициенте преобразования ее концентраторов, равном К=2, представлена на рисунке 1.



 преобразователь + тестовый образец;
 преобразователь + 1-й концентратор + тестовый образец;
 преобразователь + 1-й, 2-й концентраторы + тестовый образец;
 преобразователь + 1-й, 2-й, 3-й концентраторы + тестовый образец



Из кривых, представленных на рисунке 1, следует, что степень изменения мнимой составляющей импеданса УЗКС зависит от количества последовательно соединенных концентраторов.

На рисунке 2 представлена зависимость величины изменения жидкостного промежутка ΔL между излучателем и контролируемым покрытием от мнимой составляющей импеданса Im УЗКС от для различных вариантов сборки УЗКС, при коэффициенте преобразования ее концентраторов равном К=2. Исходная величина

озвучиваемого жидкостного зазора принимается равной половине длины волны на частоте УЗКС.



 преобразователь + озвучиваемый водный промежуток;

2 – преобразователь+1-й концентратор +
озвучиваемый водный промежуток;
3 – преобразователь+нагрузка+1-й + 2-й концентратор + озвучиваемый водный

промежуток; 4 – преобразователь+нагрузка+1-й, 2-й, 3-й концентратор озвучиваемый водный

Из кривых, представленных на рисунке 2, следует, что степень изменения мнимой составляющей импеданса УЗКС так же зависит от количества последовательно соединенных концентраторов и их коэффициента трансформации. Однако связь мнимой составляющей Im с величиной изменения жидкостного зазора ΔL не такая сильная, как для случая, иллюстрируемого на рисунке 1.

На рисунке 3 представлены зависимости для реализации контроля кавитационного разрушения покрытия по измерению мнимой составляющей импеданса Im УЗКС при изменении жидкостного промежутка ΔL при различных соотношениях рабочего (грибовидного) окончания и концентратора диаметром D_s, к которому присоединен грибовидный рабочий инструмент. Рассмотрены следующие варианты: K_n = 1 – диаметр рабочего окончания равен меньшему диаметру D_s концентратора; K_n = 2 – диаметр рабочего окончания равен (D_s + D_L)/2; K_n = 3 – диаметр рабочего окончания озвучиваемого жидкостного зазора так же принимается равной половине длины волны на частоте УЗКС.



Рисунок 3 – Зависимость мнимой составляющей импеданса Im УЗ излучателя от параметра ΔL для K_п = 1, 2, 3

Из кривых, представленных на рисунке 3, следует, что для повышения чувствительности метода косвенного контроля степени кавитационного износа материалов и их покрытий следует использовать степень изменения мнимой составляющей импеданса УЗКС при изменении площади контакта УЗКС.

В результате проведенных исследований выявлена и обоснована возможность контроля степени кавитационного износа тестовых образцов, выполненных из

различных материалов, а также и их защитных покрытий по измерению параметров пьезоэлектрических УЗ колебательных систем (УЗКС), применяемых для формирования в жидких средах кавитационного воздействия.

Установлено, что наиболее чувствительным к величине кавитационного износа исследуемых тестовых образцов является мнимая часть импеданса УЗКС.

Анализ разработанных моделей, позволил предложить методику контроля степени кавитационного износа образцов, являющихся или не являющихся элементами конструкции УЗКС с учетом особенностей используемых на практике УЗКС.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00017.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кавитационная эрозионная стойкость аустенитной стали 316L, обработанной методом селективного лазерного плавления / S. Hardes [и др.] // Additive Manufacturing. – 2019. – № 29.

2. Romero, M.C. Кавитационная эрозионная стойкость нестандартного литого кобальтового сплава: влияние солюбилизирующей и холодной обработки давлением / M.C. Romero, A.P. Tschiptschin и C. Scandian // Wear. – 2019. – № 29. – С. 518-526.

3. Оценка стойкости к кавитационной эрозии аморфных/нанокристаллических покрытий на основе дугового напыления в растворе NaCl / J. Lin [и др.] // Results in Physics. – 2019. – № 12. – С. 597-602.

4. Sampath S. Обеспечение максимальной эффективности ультразвуковых технологий в средах с жидкой фазой / M.S. Lamana, G.M. Pukasiewicz и S. Sampath // Wear. – 2018. – № 398-399. С. 209-218.

5. Обеспечение максимальной эффективности ультразвуковых технологий в средах с жидкой фазой / Yi. Zhang [и др.] // Wear. – 2018. – № 410-411. – С. 232-238.

6. Метод и средства кавитационно-эрозионных испытаний в аномальных условиях / В.Н. Хмелёв [и др.] // Материалы Международной научной конференции по прикладной физике, информационным технологиям и инженерии. – 2020.

7. Контроль импедансных характеристик ультразвуковых излучателей для исследования процессов и явлений, происходящих в жидких средах / В.Н. Хмелёв [и др.] // 20-я Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам, EDM: Материалы конференции. – 2019. – С. 212–216.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

Степаненко Д.А., Киндрук А.Н., Богдан П.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь stepd@tut.by

Ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) нашли широкое применение в медицине и технике. Для эффективной работы УЗКС одна из собственных частот колебаний концентратора должна быть согласована с рабочей частотой генерирующего колебания ультразвукового преобразователя, что требует точного определения этих частот. Следовательно, контроль частотных характеристик ультразвуковых концентраторов является актуальной и практически востребованной задачей.

В неразрушающем контроле для экспериментального определения собственных частот колебаний используют интегральный метод свободных колебаний (ИМСК). основанный на возбуждении свободно затухающих колебаний в объекте контроля путем кратковременного ударного воздействия и регистрации отклика на него. Так как ударное воздействие вызывает возбуждение в широкой полосе частот с шириной, обратно пропорциональной длительности удара, то в объекте контроля одновременно возникают затухающие колебания на нескольких собственных частотах, лежащих в полосе частот возбуждения. Собственные частоты определяются по спектру отклика регистрируемого С помощью первичного преобразователя. объекта. Цель исследования состояла в проведении сравнительного анализа эффективности применения различных типов первичных преобразователей для оценки собственных частот с помощью ИМСК.

Объектом исследований являлся кольцевой концентратор ИЗ среднеуглеродистой стали со следующими параметрами: наружный диаметр 45,5 мм; внутренний диаметр 40 мм; эксцентриситет 0,75 мм; толщина в осевом направлении 3,5 мм. Ударное воздействие производилось с помощью шарика диаметром 3,2 мм из закаленной стали ШХ15, падающего под действием силы тяжести по направляющей из Для моделирования свободных граничных условий стеклянного капилляра. концентратор устанавливался на подвесе в виде тонкой горизонтальной нити. Регистрация отклика концентратора производилась с помощью двух типов первичных преобразователей: контактного пленочного пьезоэлектрического датчика ИЗ поливинилиденфторида (ПВДФ) И бесконтактного микроэлектромеханического микрофона (МЭМС-микрофона). В исследованиях использовался пьезоэлектрический датчик FDT1-052K фирмы TE Connectivity (США), общая толщина которого составляет 85 мкм, что позволяет обеспечить конформное закрепление датчика на криволинейной поверхности концентратора с помощью цианакрилатного клея. Регистрация звукового поля, создаваемого концентратором при ударном воздействии, производилась с помощью MЭMC-микрофона SPU0410LR5H-QB фирмы Knowles Acoustics (США). который изготовлен в виде миниатюрного элемента поверхностного монтажа с размерами корпуса 3,76 × 3 × 1,13 мм и имеет встроенную защиту от электромагнитных наводок. Чувствительный элемент микрофона представляет собой конденсатор, один из электродов которого выполнен в форме мембраны, деформирующейся под действием звукового давления, а второй – в форме перфорированной жесткой пластины.

Важной задачей при регистрации отклика УЗКС на ударное воздействие является устранение или сведение к минимуму помех и шумов. При измерениях с помощью МЭМС-микрофона эта задача решается аппаратным способом за счет наличия встроенной в микрофон схемы подавления электромагнитных наводок. При использовании пьезоэлектрического датчика наблюдалась сетевая наводка с частотой 50 Гц, негативное влияние которой было наиболее выражено при длительных 18

измерениях, необходимых для определения добротности концентратора. Для подавления этой наводки использовались программный и аппаратный способы. В первом случае измерения проводились по псевдодифференциальной схеме с подключением электродов датчика к двум каналам цифрового осциллографа с последующим программным вычитанием полученных сигналов, при котором происходила компенсация синфазных помех, а полезные сигналы, наоборот, усиливались. Различие в амплитудах помех между каналами учитывалось умножением сигнала первого канала на масштабный коэффициент K > 1, для определения которого производилась запись синфазной помехи для обоих каналов осциллографа при отсутствии ударного воздействия. При этом порог регистрации сигнала снижался по сравнению с записью отклика на ударное воздействие и устанавливался ниже амплитудного значения помехи. При использовании аппаратного способа подавления помех измерения проводились по дифференциальной схеме, основанной на использовании вычитающей цепи на основе операционного усилителя (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема вычитающей цепи на основе операционного усилителя

Для реализации операции вычитания с масштабированием, описываемой формулой $V_{\text{вых}} = V_2 - K \cdot V_1$, использовалась схема с параметрами $R_1 = R_4$ и $R_2 = R_3 = 4R_1$. За счет выполнения резисторов R_2 и R_3 в виде сдвоенного потенциометра обеспечивалась синхронная регулировка их активных (не охваченных шунтами) частей, что дает возможность варьирования масштабного коэффициента K от 1 до 4.

Пример сигналов пьезоэлектрического датчика и МЭМС-микрофона, записанных с помощью цифрового запоминающего осциллографа, приведен на рис. 2.



Рисунок 2 – Сигналы отклика на ударное воздействие

При сравнении полученных сигналов можно заметить наличие временной задержки сигнала МЭМС-микрофона по отношению к сигналу пьезоэлектрического датчика, что объясняется конечной скоростью распространения звуковой волны в воздухе. Расхождение в форме полученных сигналов объясняется различным

характером амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) использованных первичных преобразователей: пьезоэлектрический датчик имеет практически равномерную широкополосную АЧХ, а МЭМС-микрофон – более узкополосную резонансную АЧХ, что приводит к искажению формы сигнала.

На рис. 3 представлены результаты расчета спектров сигналов, выполненного с помощью программы Mathcad.



а) для пьезоэлектрического датчика;
 б) для МЭМС-микрофона

Рисунок 3 – Спектры сигналов отклика

Из рис. З видно, что спектр сигнала для МЭМС-микрофона имеет более узкую полосу частот, что связано с ограниченной полосой пропускания микрофона (80 кГц). Собственные частоты, соответствующие колебательным смещениям в плоскости кольца, отмечены маркерами в виде крестиков и идентифицируются с помощью обоих типов преобразователей. Исключение составляет частота 3,8 кГц, которая не идентифицируется с помощью МЭМС-микрофона, так как он имеет сравнительно низкий коэффициент пропускания в области звуковых частот. Однако это не является недостатком, так как для практических применений представляют интерес частоты ультразвукового диапазона.

Несмотря на отмеченные недостатки (искажение формы сигнала и сравнительно узкая полоса пропускания), МЭМС-микрофоны обладают рядом преимуществ по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками, в частности, обеспечивают бесконтактный характер измерений и возможность многократного использования датчика и имеют низкую стоимость. В отличие от МЭМС-микрофонов пьезоэлектрические датчики не могут быть использованы многократно, так как монтируются на контролируемом объекте с помощью неразъемного клеевого соединения, недостатком которого также является влияние толщины адгезионного слоя на воспроизводимость результатов измерений.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ

Платов С.И., Железков О.С., Звягина Е.Ю.

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

В настоящее время металлообрабатывающая промышленность способна решать сложные задачи обработки заготовок разной степени твердости [1-2]. Это возможно благодаря применению принципиально новых способов воздействия на материал, среди которых и широкая группа электромеханических методов [3]. Одной из наиболее эффективных технологий данного типа является ультразвуковая обработка (УЗО), базирующаяся на принципах электроакустического излучения. Специалистами фирмы «Северо-Западный Центр ультразвуковых технологий» (г. С.-Петербург) под руководством профессора Ю.В. Холопова [4]. разработаны технология и оборудование для выглаживания поверхностей металлов с использованием ультразвуковых колебаний - безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО).

Цель данной работы заключается в повышении качества обрабатываемой поверхности, за счет применения безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) и исключении операции шлифования.

Комплекты БУФО используются как на токарных, так и на фрезерных станках, предназначенных для металлообработки. На рисунке 1 представлена деталь, отверстие которой обработано с помощью БУФО.



Рисунок 1 – Чертеж детали

Проведение эксперимента осуществлялось на токарно-винторезном станке модели 1К62 с использованием установки БУФО-0,63/22 (изготовитель «Северо-Западный Центр ультразвуковых технологий»). Материал обрабатываемой детали сталь н45, материал инструмента сталь ШХ-15.

Технические характеристики данной установки и кинематические возможности токарно-винторезного станка позволяют производить обработку на следующих режимах:

• усилие прижатия режущего инструмента к обрабатываемой детали с помощью груза составляет 380 H,

- частота колебаний инструмента 18...24 кГц,
- амплитуда колебаний 10...20 мкм,
- скорость обработки поверхности детали составляет около 1,0 м/с,
- продольная подача инструмента S = 0,125 мм/об.

На рисунке 2 представлена микротопография поверхности, обработанная с наложением УЗК. Исследования микротопографии поверхностей [3], обработанных с применением БУФО, осуществлялись на профилометре Mahr S2 и 3D-интерферометре Bruker GT K1 в научно-исследовательском центре «Микротопография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»¹.



Рисунок 2 – Микротопография обработанной поверхности с использованием ультразвукового упрочнения

Для оценки качества обработанных поверхностей использовался критерий маслоемкости Sv, который определялся следующим образом:

$$Sv = Vv/S,$$
 (1)

где Vv-объем впадин на интервале высот h [0,05Z_{max} - 0,8Z_{max}];

S – площадь поверхности.

Этот критерий позволяет оценить микрорельеф поверхности и характеризует толщину масляной пленки, усреднённую по площади.

На рисунке 3 приведены сравнительные кривые критерия маслоемкости двух различных видов обработки.



Рисунок 3 – Маслоемкость поверхностей, обработанных разными способами

Применение технологии БУФО позволяет получить требуемую шероховатость обрабатываемой поверхности, формировать направленный регулярный рельеф,

¹ В исследованиях принимал участие Белов В.К.

обладающий достаточной маслоемкостью, что способствует лучшему вовлечению смазочного материала, а также позволяющий исключить технологическую операцию - шлифование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2023-0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование влияния способа обработки и микротопографии шероховатых слоев на маслоемкость поверхностей трения / В. Л. Басинюк, П. А. Витязь, М. А. Леванцевич [и др.] // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 4. – С. 387-399. – DOI 10.32864/0202-4977-2021-42-4-387-399.

2. Повышение точности формы отверстий в составных деталях / Козлов А.В., Дерябин И.П., Верещагин В.С., Платов С.И., Кургузов С.А., Терентьев Д.В., Звягина Е.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 129-136.

3. Формирование микротопографии поверхности металлов и сплавов пластическим деформированием с наложением ультразвуковых колебаний и колебаний низкой частоты / О. С. Железков, П. А. Дьяков, В. К. Белов [и др.] // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2014. – № 20. – С. 128-134.

4. Холопов Ю.В. Машиностроение: ультразвук: УЗС, БУФО, ГЕО./ С.-Петербург: ООО «Типография «Береста», 2008.- С. 328.

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ УДАРНЫХ ВОЛН НА МЕЖФАЗНЫЕ ГРАНИЦЫ

Цыганок С.Н., Голых Р.Н., Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р.

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

В результате процесса абсорбции газа плёнкой жидкости под интенсифицирующим воздействием ультразвуковых колебаний с образованием схлопывающихся кавитационных пузырьков возникает влияние кавитационных ударных волн на межфазные границы [1, 2]. Появляется необходимость в исследовании характера влияния данных ударных волн на границы раздела жидкой и газовой фаз и, как следствие, определении целесообразности кавитационногоакустического поглощения вредоносных газов как подхода в целом [3-5].

Для построения модифицированных решёточных уравнений Больцмана были рассмотрены исходные уравнения Навье-Стокса с учётом изменяющейся плотности. Проведены разложения данных уравнений в ряд по изменяющейся плотности среды и давлению (1).

$$N_{k}(\mathbf{x}+\mathbf{c}_{k}\Delta t,t+\Delta t) = N_{k}(\mathbf{x},t) + \frac{N_{k}^{eq}(\mathbf{u}(\mathbf{x},t)) - N_{k}(\mathbf{x},t)}{\tau} + \Delta N_{k}(\mathbf{x},t)$$
(1)

При проведении разложений считалось, что объём жидкости вблизи межфазной поверхности за время действия импульса ударной волны не совершает пространственных перемещений на величину более чем размер схлопывающегося кавитационного пузырька. Причем это связано с малым временем длительности импульса ударной волны.

Созданная численная модель основана на микроскопических уравнениях диффузии и концентрационного взаимодействия на межфазной поверхности. Предложен способ усреднения уравнений, который позволяет свести их к виду, описывающему движение в однородной плёнке с плоской поверхностью (при этом эквивалентный коэффициент концентрационного взаимодействия и эквивалентный коэффициент диффузии будут отличаться от аналогичных параметров в сплошной жидкости).

Предложен способ решения уравнений, основанный на разложении концентрации газа в ряд по степеням расстояния от наблюдаемой точки до плёнки (2).

$$\sum_{i=1}^{N} C_i \left(\frac{y}{h}\right)^{2i}$$
(2)

При этом каждый коэффициент разложения может быть представлен аналитическим выражением.

Указанное представление позволяет проводить априорные оценки влияния изменения профиля поверхности жидкости и параметров пузырьков в ней на скорость поглощения газа (масса поглощаемого газа в единицу времени на единицу площади свободной поверхности). Это может быть достигнуто за счёт проведения верхних оценок слагаемых ряда и скорости сходимости ряда (таким образом, определяется минимальное количество слагаемых для оценки скорости диффузии).

Для параллельного расчёта разрушения и эволюции межфазной поверхности спроектирована, разработана и создана программа, обеспечивающая высокопроизводительные вычисления на многоядерных процессорных системах.

Предложена параллельная программа, основанная на спинодальной декомпозиции по потокам с использованием стандартного интерфейса обмена 24

сообщениями (МРІ) при расчёте деформации межфазной поверхности методом решёточных уравнений Больцмана.

Для расчёта объёмной силы предложен подход, основанный на предварительных её вычислениях и дальнейшей аппроксимации результатов вычислений. А именно, проводилось аппроксимация профиля межфазной поверхности квадратичной функцией от 2-х переменных. Затем проводились предварительные вычисления в зависимости от 7-ми параметров – 4-х коэффициентов аппроксимации профиля межфазной поверхности (считается, что свободный член в функции аппроксимации автоматически учитывается в координате положения пузырька по оси у, кроме того для профилей межфазной поверхности, отличающихся между собой лишь её поворотом на угол вокруг оси z, проводился один расчёт), 3-х координат схлопывающегося относительно положения центра пузырька поверхности, максимальный радиус пузырька в момент расширения.

При проведении таких вычислений проводилось распараллеливание по параметрам. Разработан планировщик задач, обеспечивающий максимально возможную полную загрузку ядер процессора при различии времён выполнения каждой задачи (одна задача — расчёт профиля объёмной силы при одном наборе параметров).

Создан программный модуль для визуализации деформации межфазной поверхности и распределения концентрации на базе технологии Microsoft Direct X.

Выводы

Предложенная численная модель распространения импульсных (ударных) волн при схлопывании кавитационных пузырьков и отражения волн от межфазной поверхности основана на подходе расщепления по физическим процессам. Предложенный подход заключается в том, что рассматривается начальная стадия распространения ударной волны с учётом нелинейных искажений, вносимых явлениями переноса импульса. На начальной стадии межфазная поверхность не влияет, и ударная волна рассчитывается аналитическим методом (впервые предложен аналитический метод расчёта распространения ударной волны с учётом нелинейных искажений за счёт нелинейной зависимости плотности от давления и переноса импульса). На конечной стадии распространение ударной волны рассчитывается на основании метода конечных элементов.

Построены и модифицированы решёточные уравнения Больцмана, которые учитывают импульсный характер объёмной силы.

Объемная сила приводит к эволюции межфазной поверхности, но при этом свободна от обобщённых функций (дельта-функций). Объёмная сила в построенных уравнениях учитывалась в виде моментов функции вероятности случайного процесса схлопывания кавитационных пузырьков и представляет собой бесконечно дифференцируемую функцию. Численные решения модифицированных решеточных уравнений Больцмана получены путём интегрирования уравнений Навье-Стокса и их обратного преобразования к LBE.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ 22-29-00828 «Кавитационно-акустическое формирование многосвязной межфазной поверхности «газ-жидкость» для решения проблемы высокоэффективного поглощения газов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В.Н. Ультразвуковое воздействие в решении проблемы уменьшения карбонового следа: научные основы и технические предложения [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, С.Н. Цыганок, А.Р. Барсуков. – Промышленные процессы и технологии, 2021. – Т. 1. – № 2. – С. 6-22.

2. Preobrazhensky, V. Explosive Instability of Gravity-Capillary Waves under Ultrasound Radiation Pressure [Teкct] / V. Preobrazhensky, V. Aleshin, and P. Pernod. – Phys. Wave Phen, 2018. – Vol. 26. – pp. 234–242.

3. Голых, Р.Н. Теоретическое обоснование механизма ультразвуковой дегазации жидкости за счёт сближения пузырьков [Текст] / Р.Н. Голых, С.Н. Цыганок, В.Н. Хмелёв, А.Р. Барсуков, В.А. Шакура // Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем: материалы XXV Всероссийского семинара / Под ред. М.Г. Садовского; отв. за вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 74-80.

4. Цыганок, С.Н. Стенд для исследования кавитационного-акустического поглощения углекислого газа [Текст] / С.Н. Цыганок, А.Р. Барсуков, В.А. Шакура // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2022): межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Вып. XVII. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2022. – С.42-43.

5. Khmelev, V.N. Ensuring the uniformity of oscillations of a flat membrane by sources of ultrasonic impact [Teкct] / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, S.N. Tsyganok, A.R. Barsukov. – Journal of Physics: Conference Series, 2022. 2388 (2022) 012044, pp. 1-6

МЕХАНИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОРИСТОГО ПОРОШКОВОГО СПЛАВА Ті-18Zr-15Nb

Маркова Г.В., Пермякова Д.В. ТулГУ, Тула, Россия galv.mark@rambler.ru,darya.per@gmail.com

Механическая спектроскопия изучает спектры поглощения энергии при наложении периодического механического воздействия в разных частотных диапазонах, в том числе в ультразвуковом. Коэффициент затухания ультразвука характеризует потери за счет различных механизмов – дислокационное поглощение, поглощение, обусловленное тепловыми и термоупругими эффектами, наличием примесей, магнитострикцией и др. Скорость распространения ультразвука связана с константами упругости материала – модулем нормальной упругости, модулем сдвига, коэффициентом Пуассона. Аналогичную информацию можно получить, используя механическое возбуждение колебаний в низкочастнотном диапазоне. В этом случае коэффициент затухания аналогичен внутреннему трению Q⁻¹, а резонансная частота при свободно-затухающих колебаниях пропорциональна упругим константам.

Объектом настоящего исследования является сплав системы Ti- Zr-Nb, который рассматривается, как материал для изготовления имплантатов. Сплав обладает сверхупругостью и низкими значениями модуля упругости, что обеспечивает биомеханическую совместимость с костной тканью. Пористость, приобретенная в процессе изготовления сплава методом порошковой металлургии, способствует улучшению вживляемости имплантата.

Состав порошкового сплава и литого аналога приведен в таблице.

Сплав	Ti	Zr	Nb	0	Ν	С
	Macc.%					
Порошковый	OCH.	26,6	21,9	0,15	0,15	0,039
Литой	OCH.	26	22	0,06	0,001	-

Таблица – химический состав исследованных сплавов

Исследовали температурные зависимости внутреннего трения (T3BT) и квадрата резонансной частоты (T3 f^2) образцов сплава Ti-18Zr-15Nb в интервале температур от (-150) ⁰C до +550 ⁰C. Испытаниям на механическую спектроскопию подвергали проволочные пористые образцы, полученные спеканием гидридно-кальциевого порошка с пористостью 15-22%, а также образцы, изготовленные из литого сплава Ti-18Zr-15Nb. Измерение упругих и неупругих характеристик образцов сплава Ti-18Zr-15Nb выполняли на полуавтоматической низкочастотной установке внутреннего трения РКМ-ТПИ [1]. Измерения T3BT и T3 f^2 проводили со средней скоростью нагрева/охлаждения ~ 3-4°C/мин. Частота свободных колебаний литого образца в среднем составляла γ = 8*10⁻⁵, пористого - γ =1,15* 10⁻⁴. Измерения температурных зависимостей BT и f^2 проводили по следующей схеме: охлаждение от комнатной температуры (RT) до предельно низкой температуры – отогрев до RT – нагрев до температуры 550 °C – охлаждение до RT.

На рисунке 1,а приведены полученные T3BT и T3 f^2 литого образца. На температурной зависимости внутреннего трения формируется несколько неупругих эффектов разной природы. При охлаждении от комнатной температуры до (-150) ^оС наблюдается повышение уровня BT, которое сопровождается также незначительным повышением f^2 . При последующем нагреве в диапазоне температур от (-150) ^оС до 200 ^оС уровень BT снижается до фоновых значений, как и величина f^2 . В области температур 250...400 ^оС на T3BT обнаружена область с повышенным уровнем рассеяния энергии до 12*10⁻³, которая сопровождается аномальным экстремальным



поведением T3*f*². В ходе нагрева до 550 ^оС наблюдается рост уровня ВТ, повидимому, зернограничной природы.

Рисунок 1 – ТЗВТ и ТЗ f^2 при нагреве и охлаждении литого образца (а) и пористого (б).

При охлаждении изменение ВТ в интервале температур от 550...200 ^оС происходит в обратном порядке, однако поведение упругих свойств существенно отличается от f'(T) при нагреве. Вместо повышения величины f' при температурах 250...400 ^оС наблюдается небольшое ее снижение.

Анализ литературы показал, что в интервале температур 200...400 ^оС формируется несколько Сноековских релаксационных максимумов ВТ, обусловленных взаимодействием атомов внедрения, в частности, кислорода, с атомами основных компонентов – Ti, Zr, Nb [2]. Аномальное же поведение модуля сдвига в этой области температур, по данным литературы, связано с выделением ω -фазы [3]. Отметим, что при приближении к температуре (-150) ^оС устойчиво обнаруживается подъем уровня ВТ и повышение f^2 . По-видимому, подъем уровня ВТ связан именно с мартенситным превращением, происходящим при отрицательных температурах (-100...-150) ^оС [4,5]. К сожалению, ограниченные инструментальные возможности по охлаждению образца не позволили измерить T3BT и T3 f^2 при температурах ниже (-150) ^оС и полностью получить и идентифицировать мартенситную природу пика BT.

Температурные зависимости ВТ и f^2 образца пористого сплава Ti-18Zr-15Nb приведены на рисунке 1,б. Общий вид зависимостей $Q^{-1}(T)$ и $f^2(T)$ при нагреве и охлаждении в целом аналогичен T3BT и T3 f^2 компактного сплава, однако отмечаются некоторые особенности.

Самое существенное отличие в температурных спектрах касается при температурах более 400 °С. высокотемпературного повышения ВТ Так называемый низкотемпертурный зернограничный максимум ВТ располагается при температурах (0,3-0,5) Т_{пл} [6]. Принимая во внимание, что сплав плавится приблизительно при 1700 °C, зернограничный максимум ВТ должен формироваться в области температур 500 °C, что и наблюдается в литом сплаве. В порошковом образце повышение ВТ зернограничной природы не отмечено вплоть до температуры 550 °С. Это свидетельствует об усилении взаимодействия примесей с границами зерен, повышением энергии активации зернограничного пика и за счет этого смещением его в область более высоких температур, что, очевидно, связано с большим количеством примесей внедрения в порошковом сплаве.

С увеличением пористости образца наблюдается также повышение уровня фонового рассеяния энергии (рис.2), что согласуется с литературными данными. В [7]

показано, что в высокопористых материалах уровень амплитуднонезависимого внутреннего трения возрастает с увеличением пористости.



Рисунок 2 – Зависимость фонового внутреннего трения от пористости образца

Отмечено, что высота релаксационных пиков выше в пористом образце: 180*10⁻⁴ (охлаждение) и 130*10⁻⁴ (нагрев) против 110*10⁻⁴ (охлаждение) и 100*10⁻⁴ (нагрев) в компактном. Возможно, это связано с большим содержанием примесных атомов внедрения в порошковом сплаве. Низкотемпературный эффект ВТ, гипотетически связанный с МП, в пористом сплаве находится в том же диапазоне температур, но несколько меньше по величине, чем в литом, что, может быть связано с релаксацией мартенситных напряжений на свободных поверхностях пор.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-23-20124, https://rscf.ru/project/22-23-20124/) и Комитета Тульской области по науке и инноватике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин С.А., Архангельский С.И. Универсальный вакуумный релаксатор // Проблемы прочности. – 1971. - № 5. – С. 120-124

2. Almeida H., Grandinia C.R., Caramb R. Anelastic spectroscopy in a Ti alloy used as biomaterial // Materials Science and Engineering: A, 2009, p. 59–62.

3. Dubinskiy S., Markova G., Baranova A., Vvedenskiy V., Minkova I., Prokoshkin S., Brailovski V. A non-typical Elinvar effect on cooling of a beta Ti-Nb-Zr alloy//Materials Letters. V. 314, May 2022, 131870

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

5. Kim K. M., Kim H. Y., Miyazaki S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and Young's modulus in Ti–Nb–Zr alloys //Materials. – 2020. – T. 13. – №. 2. – C. 476.

6. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях/ М.С.Блантер, Ю.В.Пигузов, Г.М.Ашмарин и др. -М.:Металлургия.-1991.- 248 с.

7. Liu C. S., Zhu Z. G., Han F. S., Banhart J. Study on nonlinear damping properties of foamed Al//Philosophical Magazine A, 2000., 80:5, p. 1085-1092.

УЛЬТРАЗВУК КАК СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ КАРБОНОВОГО СЛЕДА

Цыганок С.Н., Голых Р.Н., Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р.

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

Карбоновый (или углеродный) след – это количество углекислого газа и мельчайших частиц углерода, поступающих в атмосферу из-за использования человеком продуктов природного топлива. Одним из искусственных методов снижения «карбонового следа» является абсорбция. Для эффективной реализации абсорбции существует необходимость применения внешних энергетических воздействий для повышения производительности процесса поглощения. В частности это увеличение межфазной поверхности «жидкость-газ» и коэффициента диффузии.

Механические колебаний ультразвуковой частоты могут и являются таким энергетическим воздействием. Различными исследователями внешним было предложено применить ультразвуковое воздействие на плёнку жидкости вдоль которой движется поток поглощаемого газа. Полученные экспериментальные результаты эффективности такого воздействия свидетельствуют об и увеличении производительности процесса при различных вариантах взаимодействия газового потока с колеблющейся жидкостью (до 10...15% при параллельно движении потоков газа и жидкости, и до 30% при барботировании) [1].

Несмотря на положительные результаты экспериментов, не были проведен исследования по формированию колебаний жидкости в различных режимах (в том числе и с созданием кавитации) для эффективного взаимодействия с газовым потоком, не определены оптимальные условия взаимодействия и не установлены предельные возможности практической реализации такого способа. Поэтому этим проблемам, а именно: моделирование процесса ультразвуковой интенсификации абсорбции при кавитационном воздействии на жидкость для выявления оптимальных режимов (по частоте и интенсивности ультразвуковых колебаний) и условий (по площади озвучиваемой поверхности) ультразвукового воздействия, посвящена данная статья.

Схематически процесс абсорбции реализуется следующим образом. На поверхности, которая совершает колебания с ультразвуковой частотой находится пленка проточной жидкости (например, воды), над которой движется газ, содержащий СО₂. Между жидкостью и газом имеется промежуточный переходный слой, содержащий градиент концентрации молекул жидкости и газа CO₂. Под действием ультразвуковых колебаний поверхности переходной слой подвергается волнообразным возмущениям, которые увеличивают поверхность раздела «жидкость-газ» с одновременным ускорением процессов массопереноса диффузии в объёме жидкой фазы [2,3].

В общем виде математическая постановка задачи моделирования процесса абсорбции, которая учитывает поглощение через промежуточный слой и перенос в объёме газовой фазы, формулируется следующим образом (процесс считается стационарным):

$$(\mathbf{u}_{g},\nabla)C_{g} = D_{g}\Delta C_{g}; \tag{1}$$

$$(\mathbf{u}_l, \nabla) C_l = D_l \Delta C_l; \tag{2}$$

$$D_{l} \frac{\partial C_{l}}{\partial y}\Big|_{y=h} = D_{g} \frac{\partial C_{g}}{\partial y}\Big|_{y=h} = -K_{s} (C_{l} - C_{g})\Big|_{y=h};$$
(3)

где C_l – концентрация целевого компонента (CO₂) в жидкой фазе (воде), кг/м³; D_l – усреднённый коэффициент диффузии в жидкой фазе, м²/с; u_l – скорость течения жидкой фазы , м/с; C_q – концентрация целевого компонента в газовой фазе, кг/м³; D_q – коэффициент массопереноса в газовой фазе, м²/с; u_q – скорость течения жидкой фазы , м/с; K_S – коэффициент концентрационного взаимодействия, м/с; h – толщина плёнки жидкости, м. Для расчёта кинетики и эффективности процесса абсорбции CO₂, который интенсифицируется колебаниями ультразвуковой частоты, необходимы дополнительные подмодели.

Подмодель для определения эквивалентного коэффициента диффузии в жидкой фазе.

Так как эквивалентный коэффициент диффузии в жидкой фазе определяется кавитационными процессами, а жидкость является линейно-вязкой средой, то зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени в стадии расширения описывается уравнением Нолтинга–Непайреса (4), в стадии сжатия уравнением Кирквуда–Бете (5):

$$\rho\left(\frac{3}{2}\left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2 + R\frac{\partial^2 R}{\partial t^2}\right) = -4\mu \frac{\frac{\partial R}{\partial t}}{R} + p_v + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} - p_{\infty}, \qquad (4)$$

$$R\frac{\partial^{2}R}{\partial t^{2}}\left(1-\frac{\partial R}{C}\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^{2}\left(1-\frac{\partial R}{\partial C}\right)=H\left(1+\frac{\partial R}{C}\right)+\frac{\partial H}{\partial t}\frac{R}{C}\left(1-\frac{\partial R}{C}\right).$$
(5)

где *R* – мгновенный радиус пузырька, м; *ρ* – плотность кавитирующей среды, кг/м³; *p*₀ – статическое давление в жидкости, Па; *μ* – вязкость жидкости, Па·с;

 σ – поверхностное натяжение жидкой фазы, Н/м; H – энтальпия жидкости, м²/c²;

С – локальная скорость звука в жидкой фазе, м/с.

Подмодель для определения эквивалентного коэффициента концентрационного взаимодействия в жидкой фазе.

Коэффициент концентрационного взаимодействия пропорционален площади межфазной поверхности $K_s = K_{s0} \frac{S_{US}}{S_{VI} \dots m}$.

При рассмотрении стадии расширения кавитационного пузырька определялся его максимальный радиус R_{MAX} на основании уравнения Нолтинга-Непайреса (4). Затем рассчитывалась форма пузырька при его схлопывании с максимального радиуса R_{MAX} до минимальных размеров на основании интегрального уравнения (6) с граничными условиями для потенциала скорости жидкости на стенке пузырька (7).

$$\frac{\varphi(\mathbf{r}_{0})}{2} = \int_{S_{A} \cup S_{B}} \left(E_{\mathbf{r}_{0}} V_{\mathbf{n}} - \frac{\partial E_{\mathbf{r}_{0}}}{\partial \mathbf{n}} \varphi \right) \partial S ; \qquad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\left|V_{\mathbf{n}}\right|^{2} + \left|V_{\tau}\right|^{2}}{2} = \frac{2\sigma K}{\rho} - \frac{P_{\nu}}{\rho} \left(\frac{3V}{4\pi R_{MAX}^{3}}\right)^{\gamma};$$
(7)

где r_0 , r – векторы координат точек стенки кавитационного пузырька или распылительной поверхности, м; φ – потенциал скорости движения жидкости на стенке кавитационного пузырька S_A или твёрдой поверхности S_B , m^2/c ; V_n и V_r – нормальная и тангенциальная компоненты скорости движения жидкости, м/с; $E_{r_0}(\mathbf{r})$ – фундаментальное решение уравнения Лапласа; V – объём кавитационного пузырька, m^3 ; ρ_n – давление насыщенных паров жидкости, ρ и σ – плотность (кг/м³) и поверхностное натяжение (H/м) жидкости соответственно; K – средняя кривизна стенок пузырька, m^{-1} .

Более детальные и подробные исследования по влиянию кавитационного процесса на процесс абсорбции приведены в работах [4-6].

Таким образом, предложенная модель процесса, разработанные подмодели и их анализ позволяют выявить все необходимые усреднённые коэффициенты

(диффузии в объёме жидкой фазы и концентрационного взаимодействия на поверхности «жидкость-газ») для определения эффективности процесса абсорбции.

Числено установлено, что при частоте ультразвукового воздействия до 22 кГц, эффективность возрастает до 1,7 раз при диффузии газа сквозь межфазную поверхность (рисунок 1).



Рисунок 1 – Распределение концентрации CO₂ при диффузии сквозь межфазную поверхность (без ультразвука, с ультразвуком)

Выводы

Предложенная и разработанная модель ультразвуковой интенсификации процесса абсорбции, учитывающая влияние волнообразных капиллярных возмущений поверхности «жидкость-газ» и ускорение диффузии в объёме жидкости за счёт кавитации позволила выявить оптимальные условия взаимодействия и установить предельные возможности практической реализации ультразвуковое воздействия на плёнку жидкости, взаимодействующей с потоком поглощаемого газа.

Исследования возможности применения ультразвукового воздействия для уменьшения карбонового следа выполнены при поддержке гранта РНФ 22-29-00828 «Кавитационно-акустическое формирование многосвязной межфазной поверхности «газ-жидкость» для решения проблемы высокоэффективного поглощения газов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laugier, F. Ultrasound in gas-liquid systems: Effects on solubility and mass transfer [Текст] / F. Laugier, C. Andriantsiferana, A.M. Wilhelm, and H. Delmas. – Ultrasonics Sonochemistry, 2008. – Vol. 15, Iss. 6. – pp. 965–972.

2. Rahimzadeh, A. Experimental study on the characteristics of capillary surface waves on a liquid film on an ultrasonically vibrated substrate [Текст] / A. Rahimzadeh, M.-R. Ahmadian-Yazdi, and M. Eslamian. – Fluid Dynamics Research, 2018. – Vol. 50, No. 6.

3. Preobrazhensky, V. Explosive Instability of Gravity-Capillary Waves under Ultrasound Radiation Pressure [Teкct] / V. Preobrazhensky, V. Aleshin, and P. Pernod. – Phys. Wave Phen, 2018. – Vol. 26. – pp. 234–242.

4. Хмелев, В.Н. Ультразвуковое воздействие в решении проблемы уменьшения карбонового следа: научные основы и технические предложения [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, С.Н. Цыганок, А.Р. Барсуков. – Промышленные процессы и технологии, 2021. – Т. 1. – № 2. – С. 6-22.

5. Голых, Р.Н. Теоретическое обоснование механизма ультразвуковой дегазации жидкости за счёт сближения пузырьков [Текст] / Р.Н. Голых, С.Н. Цыганок, В.Н. Хмелёв, А.Р. Барсуков, В.А. Шакура // Моделирование неравновесных, адаптивных и управляемых систем: материалы XXV Всероссийского семинара / Под ред. М.Г. Садовского; отв. за вып. М.Ю. Сенашова; – Красноярск: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 74-80.

6. Khmelev, V.N. Ensuring the uniformity of oscillations of a flat membrane by sources of ultrasonic impact [Τεκcτ] / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, S.N. Tsyganok, A.R. Barsukov. – Journal of Physics: Conference Series, 2022. 2388 (2022) 012044, pp. 1-6

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ХРОМИСТЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Марукович Е.И.¹, Стеценко В.Ю.¹, Стеценко А.В.² ¹Ассоциация литейщиков и металлургов, г. Минск, Беларусь, *E-mail: stetsenko.52* @bk.ru ²Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

Основным легирующим элементом хромистых никелевых сплавов (ХНС) является хром. В системе *Ni* – *Cr* до 40% хрома из расплава кристаллизуется *γ*-фаза, которая представляет собой твердый раствор хрома в никеле [1]. Принято считать, что водород не влияет на кристаллизацию ХНС, но способствует образованию в отливках газовых раковин и газоусадочной пористости [1]. При этом не учитывается адсорбционная активность атомов водорода по отношению к никелю и хрому. Известно, что стандартные теплоты адсорбции атомарного водорода никелем и хромом составляют соответственно 122 кДж/моль и 189 кДж/моль [2].

Механизм влияния водорода на кристаллизацию ХНС можно объяснить с позиции наноструктурной кристаллизации металлов и сплавов [3, 4]. При плавлении ХНС микрокристаллы γ -фазы будут распадаться на элементарные нанокристаллы никеля (Ni_{3H}) , свободные атомы никеля (Ni_a) , элементарные нанокристаллы хрома (Cr_{3H}) и свободные атомы хрома (Cr_a) . Расплавы ХНС активно реагируют с атмосферным воздухом, содержащим пары (молекулы) воды. Они взаимодействуют с Ni_{3H} и Cr_{3H} с образованием атомарного водорода по следующим реакциям:

$$Ni_{\mathcal{H}} + (H_2 O)_M = (NiO)_{\mathcal{H}} + H_{\mathcal{A}},$$

$$Cr_{\mathcal{H}} + (H_2 O)_M = (Cr_2 O_3)_{\mathcal{H}} + H_{\mathcal{A}},$$
(1)

где $(H_2O)_{\rm M}$ – молекулы воды; $(NiO)_{\rm 3H}$ и $(Cr_2O_3)_{\rm 3H}$ – элементарные нанокристаллы оксидов никеля и хрома; H_a – атомы водорода.

Кроме этого, происходят следующие реакции:

$$Ni_{a} + (H_{2}O)_{M} = (NiO)_{M} + H_{a},$$

$$Cr_{a} + (H_{2}O)_{M} = (Cr_{2}O_{3})_{M} + H_{a},$$
(2)

где (*NiO*)_м и (*Cr*₂*O*₃)_м – молекулы оксидов никеля и хрома.

После реакций (1) и (2) происходят реакции с образованием микрокристаллов оксида никеля и оксида хрома:

$$(NiO)_{3H} + (NiO)_{M} = (NiO)_{MK},$$

(Cr₂O₃)_{3H} + (Cr₂O₃)_M = (Cr₂O₃)_{MK}, (3)

где $(NiO)_{MK}$ и $(Cr_2O_3)_{MK}$ – микрокристаллы оксидов никеля и хрома.

Атомы и элементарные нанокристаллы хрома и никеля в жидких ХНС не образуют гидридов [2]. Поэтому атомы водорода по диффузионному механизму будут растворяться в расплавах ХНС:

$$H_a = [H]. \tag{4}$$

При этом часть растворенного водорода адсорбируется элементарными нанокристаллами никеля и хрома. Поскольку концентрация растворенного водорода в жидких никеле и хроме малы [1, 2], то справедливы следующие уравнения, согласно закону Генри [5]:

$$\{H\}Ni_{\mathfrak{H}} = k_1[H],$$

$$\{H\}Cr_{\mathfrak{H}} = k_2[H],$$

$$(5)$$

где k_1 и k_2 – константы Генри; $\{H\}Ni_{\mathfrak{H}}$ и $\{H\}Cr_{\mathfrak{H}}$ – адсорбированные на элементарных нанокристаллах никеля и хрома атомы водорода.

Из уравнений (5) следует, что концентрация адсорбированного водорода в жидких ХНС пропорциональна концентрации растворенного водорода.

При взаимодействии ХНС с молекулами кислорода атмосферного воздуха последние могут диссоциировать на атомы. Для этого необходимо затратить стандартную теплоту, равную 500 кДж/моль, или 250 кДж/моль на атомарный кислород [6]. При его адсорбции хромом выделяется стандартная теплота, равная 729 кДж/моль, а при адсорбции атомов кислорода никелем – 448 кДж/моль [2]. Поэтому атомы кислорода в жидких ХНС будут адсорбироваться Cr_{эн} и Ni_{эн}. Стандартная теплота образования NiO составляет 239 кДж/моль [7]. Эта величина меньше стандартной теплоты адсорбции атомарного кислорода никелем. Поэтому элементарные ХНС не нанокристаллы никеля в расплавах будут взаимодействовать С адсорбированными атомами кислорода. Половина стандартной теплоты образования *Сг*₂*О*₃ при расчете на атомарный хром, составляет 571 кДж/моль [7]. Эта величина меньше стандартной теплоты адсорбции атомарного кислорода на хроме. Поэтому элементарные нанокристаллы хрома в расплавах ХНС не будут взаимодействовать с адсорбированными атомами кислорода.

Затрачиваемая стандартная теплота диссоциации молекул атмосферного азота равна 947 кДж/моль, или 474 кДж/моль на атомарный азот [6]. При его адсорбции хромом выделится стандартная теплота, равная 440 кДж/моль, а при адсорбции атомов азота никелем – 118 кдж/моль [2]. Поэтому азот в атомарном виде не может из атмосферы проникать в жидкие ХНС и адсорбироваться Ni_{2H} и Cr_{2H} .

По сравнению с жидким никелем и хромом, кислород мало растворим в этих твердых металлах [2]. При затвердевании расплавов ХНС происходит десорбция атомарного кислорода и образование оксидов хрома и никеля. Они неблагоприятно влияют на свойства отливок. Поэтому жидкие ХНС раскисляют, что снижает концентрацию растворенного, а значит, и адсорбированного кислорода. Его место сразу занимает адсорбированный водород. Поэтому он способен влиять на кристаллизацию ХНС. Этот процесс является наноструктурным и происходит следующим образом [4]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы γ -фазы (γ_{cH}) по следующей реакции:

$$Ni_{\rm 2H} + Ni_a + Cr_{\rm 2H} + Cr_a = \gamma_{\rm CH}.$$
(6)

Затем образуются центры кристаллизации *γ*-фазы (*γ*_{шк}):

$$\gamma_{\rm \tiny 3H} + Ni_a + Cr_a = \gamma_{\rm \tiny LK}.\tag{7}$$

Заканчивается процесс формированием микрокристаллов *γ*-фазы (*γ*_{мк}) по следующей реакции:

$$\gamma_{\rm LK} + \gamma_{\rm CH} + Ni_a + Cr_a = \gamma_{\rm MK}.$$
(8)

Из уравнений (6) – (8) следует, что зеренная структура отливок ХНС зависит от концентрации центров кристаллизации микрокристаллов *γ*-фазы при затвердевании расплавов. Чем выше концентрация $\gamma_{\rm цк}$, тем более дисперсной становится структура отливок.

Водород, адсорбируясь на элементарных нанокристаллах никеля и хрома, препятствует объединению нанокристаллов в центры кристаллизации микрокристаллов *γ*-фазы при затвердевании ХНС. В результате концентрация $\gamma_{\rm цк}$ 34

уменьшается, что приводит к укрупнению зерен в структуре отливок. Поэтому адсорбированный водород является демодифицирующим элементом структуры ХНС при их кристаллизации.

Для измельчения зеренной структуры в отливках ХНС необходимо уменьшить в их расплавах концентрацию адсорбированного водорода. Для этого, согласно уравнениям (5), нужно снизить в жидких ХНС концентрацию растворенного водорода. На практике это достигается применением модификаторов, содержащих цирконий, бор [1]. Они являются активными гидридообразующими элементами, но в жидких ХНС не образуют гидридов [2]. Зато в расплавах соединения циркония и бора способны активно и относительно длительно адсорбировать растворенный водород, уменьшая концентрацию адсорбированного водорода. Аналогично действует ультразвук, существенно снижая концентрацию водорода в расплаве [8]. В результате увеличивается концентрация центров кристаллизации микрокристаллов *γ*-фазы, что приводит к измельчению зеренной структуры в отливках ХНС при их затвердевании.

Таким образом, водород оказывает демодифицирующее влияние на формирование зеренной структуры в отливках хромистых никелевых сплавов при кристаллизации их расплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебное пособие / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов. – М.: МИСиС, 2011. – 615 с.

2. Константы взаимодействия металлов с газами: справочник / По ред. Б.А. Колачева и Ю.В. Левинского. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.

3. Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С. 23–26.

4. Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация бинарных сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // Литейное производство. – 2022. – № 7. – С. 2–4.

5. Жуховицкий, А.А. Физическая химия / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. – М.: Металлургия, 2001. – 688 с.

6. Свойства элементов: справочник. Ч. 1 / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – 660 с.

7. Физико-химические свойства окислов: справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

8. Воздвиженский, В.М. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В.М. Воздвиженский, В.А. Грачев, В.В. Спасский. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

Сосновский И.А.¹, Белоцерковский М.А.¹, Курилёнок А.А.¹, Кузнечик О.О.² ¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ, sos3@tut.by ²Институт порошковой металлургии Минск, РБ, oleg-kuznechik@yandex.ru

Анализ физических и технологических особенностей процесса центробежной индукционной наплавки (ЦИН) с использованием наложения активирующих крутильных колебаний заготовки позволяет предложить методику определения параметров уплотнения порошкового слоя на основе контроля параметров этих колебаний при условии дополнительного оснащения технологического оборудования соответствующими измерительными датчиками и приборами [1-5].

Научная гипотеза в данном случае состоит в том, что предполагается изменение (увеличение) момента инерции, технической системы, включающей вращающуюся заготовку с порошком, в результате усадки порошкового слоя при ЦИН, что, в свою очередь, вызывает изменение параметров крутильных колебаний. Измерение этих параметров позволяет контролировать процесс усадки и уплотнения.

Для вывода уравнений методики, связывающих параметры уплотнения и крутильных колебаний, рассмотрим основные уравнения для этих процессов. Дифференциальное уравнение малых вынужденных колебаний в общем случае записывается следующим образом [6]:

$$b_0 \ddot{x} + r\dot{x} + \beta_0 x = F(t); \tag{1}$$

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{b_0} F(t),$$
 (2)

где *F*(*t*) – обобщенная периодическая внешняя сила, сопряженная с обобщенной координатой *х*.

Сила *F*(*t*), вызывающая вынужденные колебания системы, называется возмущающей или вынуждающей силой. Для процесса вынужденных крутильных колебаний уравнение (2) можно записать в виде:

$$\ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = \frac{1}{b_0} M(t), \qquad (3)$$

где δ – коэффициент затухания, $\delta = r/2b_0$; ω_0 – циклическая частота свободных колебаний системы в отсутствие трения (резонансная частота) $\omega_0 = \sqrt{c/J}$; b_0 – момент инерции системы, $b_0 = J$; ϕ – угол поворота относительно положения равновесия (при отсутствии вынуждающей силы); M(t) – момент силы, вызывающей вынужденные крутильные колебания; c – крутильная жесткость системы; r – обобщенный коэффициент трения.

Если момент возмущающей силы изменяется по гармоническому закону:

$$M(t) = M_0 \cos \Omega t . \tag{4}$$

В результате решения дифференциального уравнения (3), получим, что установившиеся вынужденные колебания также являются гармоническими, причем совершаются с той же циклической частотой Ω:

$$\varphi = A\cos(\Omega t + \varphi_1); \tag{5}$$

$$A = \frac{M_0}{b_0 \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta^2 \Omega^2}};$$
 (6)

$$tg\phi_1 = -\frac{2\delta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} \,. \tag{7}$$

где *А* – амплитуда вынужденных колебаний; *М*₀ – амплитуда момента возмущающей силы; ϕ_1 – угол сдвига фаз вынужденных крутильных колебаний.

36

Подставив выражения и преобразовав уравнение (6) получаем выражение для определения момента инерции системы по результатам измерения амплитуды вынужденных крутильных колебаний в виде:

$$J = \frac{1}{\Omega^2} \left(\widetilde{n} - \sqrt{\frac{M_0^2}{A^2} - r^2 \Omega^2} \right).$$
(8)

Дважды дифференцируя уравнение (5), получим:

 $B = \Omega^2 A$,

$$\dot{\phi} = -B\cos(\Omega t + \phi_1); \tag{9}$$

(10)

где В – амплитуда углового ускорения.

Из (8) получаем выражение для определения момента инерции системы:

$$J = \frac{c}{\Omega^2} - \frac{1}{\Omega} \sqrt{\frac{M_0^2}{B^2} - r^2} ; \qquad (11)$$

$$tg\phi_1 = \frac{r\omega}{c - J\Omega^2} \,. \tag{12}$$

Отсюда выражение для определения момента инерции системы по результатам измерения угла сдвига фаз вынужденных крутильных колебаний будет иметь вид:

$$I = \frac{c}{\Omega^2} + \frac{r}{\Omega t g \phi_1} \,. \tag{13}$$

Таким образом, определение момента инерции системы можно независимо осуществлять по измерению трех различных параметров: амплитуды вынужденных крутильных колебаний *A* по формуле (8), амплитуды углового ускорения крутильных колебаний *B* по формуле (11) и угла сдвига фаз вынужденных крутильных колебаний ϕ_1 по формуле (13).

Изменение момента инерции порошкового материала происходит за счет усадки и уплотнения под воздействием индукционного нагрева и центробежных сил. Порошковый материал в процессе ЦИН формируется на внутренней поверхности заготовки в виде цилиндрического слоя, тогда момент инерции *J*_n определяется:

$$J_n = \frac{m}{2} \left(R_1^2 + R_2^2 \right), \tag{14}$$

где *m* – масса порошка; *R*₁ – радиус внутренней (свободной) поверхности порошкового слоя; *R*₂ – радиус внутренней поверхности заготовки.

Следовательно, изменение момента инерции порошкового слоя вследствие его усадки:

$$\Delta J_n = \frac{m}{2} \left(R_{11}^2 - R_{10}^2 \right); \tag{15}$$

где *R*₁₀ – начальный радиус внутренней поверхности порошкового слоя; *R*₁₁ – радиус в текущем состоянии (после усадки).

Использовав закон сохранения массы, получим соотношение, связывающее текущую среднюю пористость П порошкового слоя с его текущим радиусом R₁₁, в виде:

$$\Pi = 1 - \left(1 - \Pi_0\right) \left(\frac{R_2^2 - R_{10}^2}{R_2^2 - R_{11}^2}\right),\tag{16}$$

где *П*₀ – начальная пористость порошкового слоя.

Таким образом, зная изменение момента инерции порошкового слоя ΔJ_n в процессе ЦИН активирующим воздействием крутильных колебаний заготовки, можно определить изменение его внутреннего радиуса, а, воспользовавшись после этого формулой (16), можно определить среднюю пористость порошкового слоя. При этом значения ΔJ_n вычисляются путем применения любой из формул:

$$\Delta J_n = J(A_{11}) - J(A_{10}); \tag{17}$$

$$\Delta J_n = J(B_{11}) - J(B_{10}); \tag{18}$$

37

$$\Delta J_{n} = J(\varphi_{11}) - J(\varphi_{10}); \tag{19}$$

из соотношений, соответственно, (8), (11) или (13), в которых *А* заменяется на A_{11} или A_{10} , B – на B_{11} или B_{10} , ϕ – на ϕ_{11} или ϕ_{10} , где индекс 10 относится к начальному, а 11 – текущему состоянию.

Использование выведенных уравнений (8), (11), (13), (16) – (19), позволяет на практике осуществлять контроль и управление кинетикой уплотнения порошкового слоя при ЦИН на основе использования в технологическом оборудовании датчиков и проборов для непрерывного измерения одного из параметров: амплитуды вынужденных крутильных колебаний заготовки, амплитуды углового ускорения крутильных колебаний или сдвиге фаз вынужденных крутильных колебаний заготовки относительно колебаний элементов привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Метод непрерывного контроля усадки порошкового слоя в процессе центробежной индукционной наплавки / И.А. Сосновский [и др.] // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы международной научной конференции, Витебск, 26-29 сентября 2016 г. / УО «ВГТУ» – Витебск, 2016. – С. 46–47.

2. Сосновский, И.А. Алгоритм и методика контроля температуры и пористости припекаемого порошкового слоя при индукционном нагреве / И.А. Сосновский, О.О. Кузнечик, А.М. Яркович // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: материалы 6-го Междунар. симп., Минск, 19-20 окт. 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – С. 264–273.

3. Методы и средства контроля температуры нагрева и усадки порошкового слоя в процессе центробежной индукционной наплавки / И.А. Сосновский [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19-20 сентября 2017 г. / ГУ ВПО «Белорус.-Рос. ун-т»; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 463– 468.

4. Автоматизация контроля усадки в процессе центробежной индукционной наплавки покрытий / К.Е. Белявин [и др.] // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VIII международной научно-практической конференции / Бизнесофсет; ред.кол.: Маляревич А.М. (гл.ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 28–29.

5. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин [и др.] // Под ред. В.Г. Горобцова. – Минск: Наука и техника, 1993. – 159 с.

6. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф // Главная редакция физико-математической литературы – М.: «Наука», 1979. – 944 с.

МЕХАНИЗМЫ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ

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

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия, e-mail: sergey @bti.secna.ru

Сушка обеспечивает длительное хранение продуктов. Такому хранению, с последующим восстановлением для использования, подлежат продукты, производимые пищевой, фармацевтической, химической и другими отраслями промышленности.

На практике, наибольшее распространение получил конвективный способ сушки, основанный на уносе испаренной влаги потоком нагретого воздуха. Увеличение интенсивности сушки при этом обеспечивается за счет увеличения температуры, что недопустимо для многих пищевых и химических термолабильных материалов. Поэтому ищут способы дополнительных энергетических воздействий на высушиваемый материал, позволяющих ускорить процесс без потери качества продукта.

Известно, что ультразвуковые (УЗ) колебания способствуют интенсификации процесса сушки. При этом УЗ колебания можно подводить к материалу бесконтактным способом. Вопросами такой сушки занимались многие исследователи, результаты которых показали возможность увеличения скорости процесса сушки по сравнению с конвективной, например, в 1,7 раза для моркови [1] и осадка сточных вод [2].

Ультразвуковое воздействие должно быть высокой интенсивности. Исследователи [3, 4] сходятся в том, что ускорение сушки начинается с уровня звукового давления более 125-130 дБ. В связи с этим используется понятие «критический уровень звукового давления», т. е. то звуковое давление, ниже которого звуковые колебания практически не влияют на процессы тепло-массообмена.

К сожалению, до настоящего времени отсутствует объективная информация о величине параметра УЗ воздействия, при котором начинается существенная (скачкообразная) интенсификация процесса сушки. Обусловлено это отсутствием понимания механизмов ускорения ультразвуковой сушки.

Сделанные ранее предположения [5, 6] о наличии ультразвукового распыление влаги с поверхности высушиваемого материала не имеют теоретического и практического обоснований, позволяющих устанавливать наиболее эффективные параметры и условия реализации ультразвуковой сушки.

Авторами предложена и разработана модель [7] процесса обезвоживания материалов без реализации фазового перехода за счет кавитационного диспергирования на начальном этапе сушки.

Высушиваемый материал представлен в виде капиллярно-пористого тела с развитой сетью капилляров (Рисунок 1). Заполненные водой капилляры имеют цилиндрическую форму, стенки капилляров упругие, их диаметр – 20 мкм. УЗ воздействие осуществляется на частоте 22 кГц через резонансные газовые промежутки.

Рост кавитационного пузырька приводит к его деформации и вытягиванию по оси капилляра, что обеспечивает его схлопывание и распыление влаги из высушиваемого материала. Проведенный анализ модели позволил установить зависимости объема удаляемой воды от уровня звукового давления (Рисунок 2).

Из полученных зависимостей (Рисунок 2) следует, что при малых уровнях звукового давления (до 150 дБ) наблюдается слабый рост производительности диспергирования. При увеличении звукового давления от 150 до 170 дБ (II) происходит резкий рост производительности диспергирования (и процесса сушки). При дальнейшем увеличении звукового давления выше 170 дБ (III) рост производительности диспергирования замедляется.



Рисунок 1 – Схематичное изображение процесса диспергирования влаги из капилляра



Рисунок 2 – Зависимости производительности диспергирования от уровня звукового давления для различных по размерам образцов

Для экспериментального подтверждения эффективности удаления влаги за счет диспергирования (без фазового перехода) были проведены исследования по сушке агломерированной корковой пробки. Выбор материала для исследований был обусловлен тем, что пробка имеет развитую систему трехмерных гексагональных пор размером порядка 20 мкм. Для проведения исследований пробка нарезалась кубиками размером 15х15х15 мм. Кубики располагались на расстоянии 15 мм от дискового излучателя (частота колебаний 22 кГц). Скорость потока и температура воздуха составили 0,5 м/с и 25 °С соответственно, влажность воздуха 70%.

Полученные результаты представлены на рисунке 3. Они свидетельствуют о том, что при дополнительном воздействии УЗ колебаний с уровнем звукового давления до 165 дБ можно обеспечить время сушки не более 160 мин, что соответствует сокращению времени сушки на 58%. При этом выявлено заметное сокращение времени сушки при увеличении уровня звукового давления от 150 дБ до 160 дБ.

В результате проведенных исследований предложен и разработан механизм УЗ сушки, экспериментально подтвержденный на примере реализации сушки пробки. В результате теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что существенная интенсификация процесса УЗ сушки начинается при уровне звукового давления 150 дБ.



Рисунок 3 – Кривые сушки корковой пробки при разных уровнях звукового давления

40

При увеличении звукового давления от 150 до 170 дБ возможно обеспечение существенного прироста скорости процесса сушки. Увеличение звукового давления выше 170 дБ требует значительных затрат на формирование колебаний и не способно обеспечить адекватного прироста производительности сушки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10359, https://rscf.ru/project/21-79-10359/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gallego-Juarez, J. A. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetable: Processes and devices / Gallego-Juarez J. A., Riera E., Blanco S. D. F., Rodriguez-Corral G., Acosta-Aparicio V. M., Blanco A. // Drying Technol. – 2007. – Vol. 25. – P. 1893-1901.

2. Sun, G. Y. Evaluation on the air-borne ultrasound-assisted hot air convection thinlayer drying performance of municipal sewage sludge / Sun G. Y., Chen M. Q., Huang Y. W. // Ultrasonics Sonochem. – 2017. – Vol. 34. – P. 588-599.

3. Da-Mota, V.M. Acoustic drying of onion / V.M. Da-Mota, E. Palau // Drying Technology. – 1999. – Vol. 17:4-5. – P. 855-867.

4. Fairbanks, H. Drying powdered coal with the aid of ultrasound / Fairbanks H. // Powder Technol. – 1984. – Vol. 40. – P. 257–264.

5. Kowalski, S. Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions / Kowalski S., Mierzwa D., Stasiak, M. // Dry. Technol. – 2017. – Vol. 35. – P. 939–947.

6. Kroehnke, J. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (Actinidia deliciosa) –The influence of ultrasound on process kinetics and product quality / J. Kroehnke, J. Szadzińska, E. Radziejewska-Kubzdela, R. Biegańska-Marecik, G. Musielak, D. Mierzwa // Ultrason. Sonochem. – 2021. – Vol. 71. – Article 105377.

7. Khmelev, V. N. Physical and mathematical model of the mechanism of ultrasonic dehydration of materials without phase transition of liquid into vapor / Khmelev V. N., Shalunov A. V., Golykh R. N., Terentyev S. A, Nesterov V. A. // Proceedings on Engineering. – 2022. – Vol. 4. – No. 4. – P. 481-492.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ ТАНИДНОГО ДУБЛЕНИЯ

Анисович А.Г.¹, Ласковнев А.П.², Маркевич М.И.², Акула И.П.², Чекан Н.М.², Худанов У.О.³

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси, г.Минск, Республика Беларусь, anna-anisovich@yandex.ru

²Физико-технический институт НАН Беларуси, г.Минск, Республика Беларусь ³Джизакский Государственный Педагогический Университет, г.Джизак, Республика Узбекистан

Введение. В последнее время в мире уделяется большое внимание экологическим проблемам. Одна из самых массовых технологий в легкой промышленности – хромовое дубление натуральной кожи. Это наиболее токсичный этап при обработке кожи, в процессе которого участвуют хром, свинец, мышьяк, что неблагоприятно сказывается на экологии при попадании этих веществ в почву и реки. Поэтому проводятся исследования по производству бесхромовых кож как альтернатива хромовому дублению. В частности, разрабатываются методы танидного дубления (с использованием растительных дубителей).

Натуральная кожа является износостойким, экологическим материалом, изделия из которой служат десятилетиями. Придать новые свойства натуральной коже можно за счет модифицирования поверхности материала плазмой, нанесения покрытий, как декоративных, так и изменяющих свойства поверхностного слоя [1,2]. Любая поверхность кожи в процессе выделки соприкасается с частицами пыли и имеет большое количество загрязнений как бытового, так и технического характера. Для проведения последующих операций, таких как окрашивание или нанесение покрытий необходимо провести процесс очистки поверхности натуральной кожи.

Целью работы является исследование морфологии поверхности натуральной кожи ягненка после танидного дубления и ультразвуковой очистки перед процессом нанесения декоративных покрытий.

Материалы и методики. При проведении исследований использовалась кожа «Растишка» (производство Узбекистан) после танидного дубления (кожура граната) с последующей пропиткой маслом граната Дубление производилось в течение 48 и 96 часов, а также с постепенным повышением концентрации экстракта граната от 15% - 24 часа; 35% - 24 часа; 45% - 48 часов.

Ультразвуковая очистка производилась в ванне ультразвуковой «Сапфир»-28,0 TTC. Рабочая частота составляла 35 кГц, мощность генератора - 550Вт. Очистка проводилась при комнатной температуре в деионизированной воде в течение 3 минут. Большая часть ультразвуковых очистителей работает в диапазоне частот от 28 до 120 кГц [3-7]. Низкие частоты создают кавитационные пузыри большого размера, поэтому для более мягкой очистки использовалась частота 35 кГц. В процессе очистки температуру не повышали, чтобы не вызвать отверждение белка.

Исследование поверхности кожи проводилось на металлографическом и растровом микроскопах. Современные металлографические микроскопы. контрастирования, использующие различные методы оптического позволяют исследовать структуры неметаллических материалов. В данной работе использован инвертированный металлографический микроскоп МИ-1. Анализ поверхности кожи проведен при различных увеличениях с использованием освещения по методу темного поля [8]. Принцип освещения по методу темного поля состоит в том, что поверхность образца освещается наклонными лучами света. В темном поле сохраняется натуральный цвет окрашенных объектов. Исследование химического состава кожи производилось также с использованием растрового электронного микроскопа MIRA-3 (Чехия) с системой микроанализаторов фирмы Oxford Instruments (Великобритания). Прибор позволяет одновременно исследовать морфологию поверхности материала, определить распределение химических элементов исследуемого образца, а также получить изображение объекта в широком диапазоне увеличений.

Основная часть. На рис. 1 приведен элементный состав натуральной кожи ягненка после дубления и жирования. Как видно, в составе поверхности отсутствует хром.



Рисунок 1 – Элементный состав кожи после дубления и жирования

На рис.2 представлена лицевая поверхность кожи после различных режимов дубления и жирования. После различных режимов дубления поверхность кожи имеет развитую цветовую гамму, наиболее спокойную в случае дубления с постепенным повышением концентрации, рис.2в. Также форма волосяных фолликул после этого режима дубления наиболее близка к сферической.



Рисунок 2 – Морфология поверхности кожи после дубления и жирования: а - 48 часов, б - 96 часов, в - с постепенным повышением концентрации экстракта.

После ультразвуковой чистки натуральной кожи на всех образцах цвет кожи стал ровным, без существенного колебания цветовых оттенков (рис.3). Наблюдается изменение формы волосяных фолликул – они сжимаются, что наиболее заметно для режима дубления с постепенным повышением концентрации экстракта, рис.2в, 3в. Поверхность кожи приобретает дополнительный рельеф, что наиболее ярко выражено для дубления в течение 48 часов (рис.3а).



Рисунок 3 – Морфология поверхности кожи после дубления, жирования и ультразвуковой очистки: а - 48 часов, б - 96 часов, в - с постепенным повышением концентрации экстракта.

Выводы. Методом оптической и растровой микроскопии исследована морфология поверхности натуральной кожи ягненка после танидного дубления, жирования и ультразвуковой очистки.

Очистка ультразвуком выравнивает цвет кожи, изменяет морфологию волосяных фолликул, за счет чего, вероятно, создается дополнительный рельеф поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. T.J. Kodirov, M.I. Markevich, A.N. Malyshko, V.I. Zhuravleva, N.A. Sodikov Researches of Morphological Structure, Element Composition And Natural Leather Adsorption By Exposure to Laser Radiation. International Journal of Resent Technology and Engineering.-2020.-V.8.-I.6.- P.4880-4884.

2. Т.Ж. Кодиров, Н.А. Содиков, А.П. Ласковнев, М.И. Маркевич, А.Н. Малышко, В.И. Журавлева. Особенности лазерного воздействия в процессе антисептической обработки натуральной кожи. Электроника плюс.-2020.-№2.-с.47-50.

3. Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. Применения ультразвука. Москва: Техносфера. 2006.576 с.

4. M.A. Margulis Chemical reactions in acoustic fields. Moscow: Vysshaya shkola.-1984. 272 p.

5. M.G. Sirotyuk. Acoustic cavitation. Moscow: Nauka. 2008. 271 p.

6. А.М. Медведев. Ультразвуковая очистка. Теория и практика. Схемотехника».2001. № 9.с.40-42.

7. В.В. Редько, Б.А. Багинский Источник питания ультразвуковой технологической установки. Приборы и техника эксперимента.2000. №4. с. 154- 157.

8. А.Г. Анисович Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования. Весці НАН Беларусі. сер. фіз.-тэхн. навук. 2016. № 1. с.36-42.

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВС

Хина Б.Б.^{1,2}, Клубович В.В.^{1,3}, Кулак М.М.⁴

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь ²Белорусская государственная академия авиации, Минск, Беларусь ³Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь ⁴Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь mmk_vit@mail.ru

Введение. В настоящее время в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (CBC) ведется активный поиск путей управления процессом для получения новых материалов и конечных изделий с заданными структурой, фазовым составом и, следовательно, свойствами. Эффективным способом воздействия на CBC in situ является наложение мощных ультразвуковых колебаний (УЗК). В работах по CBC в поле УЗК отсутствует убедительное объяснение изменения температуры и скорости горения, и тем более фазового состава продуктов.

В связи с этим целью данной работы является создание качественной модели для объяснения экспериментальных результатов по влиянию УЗК на СВС.

Оценка роли теплового фактора. При СВС в поле УЗК в газовой атмосфере имеет место конвективный теплоотвод от осциллирующего образца. При малых числах Рейнольдса коэффициент теплообмена α пропорционален скорости обтекания газом образца: $\alpha \sim v$, где v - скорость относительного движения конденсированной и газообразной фазы. В задачах акустики максимальная скорость относительного движения твердой фазы v записывается как $v = 2\pi f\xi$, где f - частота, $\xi - амплитуда смещения. В частности, для <math>f=18$ кГц и амплитуде УЗК $\xi=10$ мкм имеем v=1,13 м/с. Для исследованных систем и таких скоростей v число Рейнольдса Re ~ 1000 . Тогда получаем $\alpha \sim v\xi$, что хорошо коррелирует с экспериментальными данными: при увеличении амплитуды УЗК температура горения линейно падает.

Рассмотрим характерное время τ для охлаждения объекта диаметром *d*:

$$\tau = d^2 / (4\mu_0^2 a) \,. \tag{1}$$

Здесь *а* – коэффициент температуропроводности смеси реагирующих порошков, $\mu_0 = 2,4048$ – первый корень функции Бесселя нулевого порядка [1], *a* = $\lambda/(\rho c_p)$, где λ – теплопроводность, ρ – плотность, c_p – теплоемкость.

Для титана λ = 23,5 Вт/(м·К) при 1135 К [2], ρ = 4,35·10³ кг/м³ (α -Ті) при 1143 К [2], c_p = 0,617 кДж/(кг·К) при 1023 К [3]. Тогда $a \approx 8,8\cdot10^{-6}$ м²/с, и из (1) для d = 20 мм имеем τ = 2 с. Это характерное время выравнивания температуры по радиусу цилиндрического образца, что является верхней оценкой влияния теплового фактора.

Характерным временем t_x для горения является время прохождения волной горения зоны прогрева (зоны Михельсона). Ее ширина $L \sim a/U$, где U – скорость горения, a – коэффициент температуропроводности; для спрессованного CBC-образца $a\sim10^{-5}$ м²/с. Тогда $t_x=L/U$, или $t_x\sim a/U^2$. По экспериментальным данным для системы Ti–B при мольном соотношении Ti:B=1:0,75 и амплитуде УЗК ξ =15 мкм скорость горения составляла U=2 см/с. Тогда L=500 мкм и t_x =0,025 с, что в 8 раз меньше, чем τ . При размере частиц титана 50 мкм [4] в зону прогрева помещается ~10 частиц. Обычно ширина зоны быстрой реакции в волне CBC – всего несколько частиц [5].

Для СВС-процессов такая оценка величины *t*_x является заниженной, поскольку не учитывает наличие типичной для СВС широкой зоны догорания. В последней протекают пост-процессы с малым тепловыделением, которые определяют структуру продукта: а) коалесценция твердых частиц, образовавшихся ранее в зоне быстрой реакции, за счет диффузии атомов через прослойки жидкой фазы между частицами; б) кристаллизация оставшегося расплава; в) твердофазное спекание зерен (неполное).

При прохождении ультразвуковой волны по образцу ее энергия поглощается,

что приводит к нагреву, однако его роль незначительна. Как показано выше, при наложении УЗК коэффициент теплоотдачи с поверхности колеблющегося образца увеличивается, что обуславливает снижение скорости и температуры горения.

Отсюда следует, что наибольшее влияние на температуру образца УЗК оказывают на стадии охлаждения, когда идет кристаллизация, формирование зерен и пр. Это говорит о том, что роль теплового фактора существенна в основном в зоне догорания. Соответственно, понижение температуры приводит к снижению коэффициента диффузии, что замедляет коалесценцию (растворение мелких частиц и рост более крупных), что в обычных условиях обуславливает уменьшение общего числа частиц и увеличение их размера. В результате "выживает" существенно (на порядки) большее количество мелких зерен и не успевают вырасти более крупные [6]. Из закона сохранения массы следует, что в этом случае средний размер зерен продукта будет меньше, что и наблюдается экспериментально. При этом, чем больше амплитуда колебаний и, соответственно, выше скорость охлаждения расплава, тем сильнее должны проявляться эти кинетические эффекты: уменьшается средний размер зерен, состав и структура продукта могут отличаться от равновесной [7-8]. В этом заключается тепловой аспект влияния УЗК на структуру СВС-продукта.

Однако значение т является верхней оценкой, а t_x – нижней, так что влияние теплового фактора может распространяться на все зоны волны CBC.

Термодинамическим (ТД) расчетом на примере системы Ті-В [9] показано, что тепловыделение, необходимое для поддержание волны горения, происходит за счет частиц образования тугоплавких TiB₂ И расплава Ti–B в узкой зоне высокотемпературной реакции, который обладающего отрицательной избыточной энтальпией смешения. Зерна продукта кристаллизуются из расплава: состав системы при адиабатической температуре T_{ad} находится между линиями ликвидус и солидус. Из теории кристаллизации известно, что в однокомпонентной системе переохлаждение расплава ΔT существенно изменяет условия образования твердой фазы: с увеличением ΔT скорость нуклеации возрастает, а скорость диффузионноконтролируемого роста зародышей уменьшается. В условиях СВС, когда зародыши твердого продукта образуются за счет химического взаимодействия в высокотемпературном расплаве, даже небольшое переохлаждение может оказывать сильное влияние на кинетику фазообразования. Поэтому тепловой фактор (макроуровень) может действовать и в зоне реакции, влияя на основное тепловыделение в волне СВС и тем самым на скорость горения.

Роль нетеплового фактора. По экспериментальным данным, при воздействии УЗК на СВС изменяется тепловой профиль волны горения: расширяются как зона прогрева (примерно в 2–2,5 раза), так и зона химического реагирования и высокотемпературная часть зоны догорания, т.е. УЗК приводит к перераспределению тепла в волне горения. Это может быть связано с нетепловым фактором – влиянием УЗК на микроуровне на комплексное физико-химическое взаимодействие в волне СВС (растекание расплава, гетерогенные реакции и массоперенос в жидкой фазе).

Прежде всего, воздействие УЗК на жидкости приводит к ультразвуковому капиллярному эффекту (УКЭ). Влияние капиллярного растекания на режимы и скорость волны СВС исследовано теоретически для системы Ti-C [10]. Показано, что скорость стационарного горения зависит от отношения характерных времен реакции t_r и растекания t_s : $\varepsilon = t_r/t_s$. Величина t_r зависит от кинетики диффузии в слое твердого продукта или в жидкой фазе: $t_r = r_c^2/D(T)$, где r_c – радиус капилляра (здесь – половина расстояния между частицами сажи, окружающими частицу титана), $r_c \sim 1$ мкм.

Оценим величину t_s . Капиллярное давление p_c определяется как $p_c = 2\sigma \cos \theta / r_c$ [11], где σ – поверхностная энергия, θ – контактный угол смачивания. Для смачивания углерода жидким титаном θ =0, поскольку движущей силой является химическое сродство компонентов. Расстояние *I*, проходимое жидкостью по капилляру, определяется из уравнения $dl/dt = r_c^2 p_c/(8\mu l)$, где μ – динамическая вязкость, Па·с. Тогда характерное время растекания составляет $t_s = 2\mu l^2 / (r_c \sigma)$. Рассматривая реакционную ячейку радиусом R_{cel} , состоящую из частицы титана радиусом R_{Ti} , окруженной частицами сажи, получим характерное расстояние $I = R_{cel} - R_{Ti}$.

В случае, когда лимитирующей стадией является растекание (капиллярный режим), t_s велико, т.е. $\varepsilon = t_r/t_s << 1$, и скорость стационарного горения $U^2 \sim \varepsilon$ [11]. При наложении УЗК на СВС скорость растекания возрастает из-за УКЭ, т.е. характерное время t_s существенно уменьшается, что должно привести к возрастанию скорости горения. Но тогда изменится соотношение характерных времен: $\varepsilon = t_r/t_s >> 1$, и лимитирующей стадией станет кинетика взаимодействия (так называемый кинетический режим горения).

Кинетика взаимодействия в волне CBC включает образование зародышей твердого продукта в расплаве (с энергией активации E_n) и их рост, лимитируемый диффузией в расплаве (с энергией активации E_d). Эти "элементарные" процессы являются термически активируемыми, поэтому их суммарное действие можно охарактеризовать одной эффективной энергией активации E, которую для CBC-процессов определяют из экспериментальной зависимости скорости горения U от температуры T. Для кинетического режима скорость стационарного горения обычно оценивают по формуле Зельдовича – Франк-Каменецкого:

$$U^{2} = \frac{\lambda}{\rho} \frac{R(T_{0} + Q/c_{p})^{2}}{QE} k_{0} \exp\left[-\frac{E}{R(T_{0} + Q/c_{p})}\right],$$
(2)

где λ – теплопроводность, ρ – плотность, R – универсальная газовая постоянная, k_0 – кинетическая константа, Q – тепловыделение на единицу массы, $T_0 + Q/c_p = T_{ad}$, где $T_0=298$ К – начальная температура, c_p – теплоемкость; при этом $Q/c_p >> T_0$.

На микроскопическом уровне УЗК могут влиять как на эффективную энергию активации *E* за счет перемешивания расплава, так и на тепловыделение *Q* за счет изменения условий зародышеобразования конкурирующих фаз в многофазной системе. Как видно из формулы (2), при определенном соотношении между изменением параметров *E* и *Q* это может обеспечить снижение скорости горения, которое наблюдалось авторами экспериментально в системах Ti-C-Ni-Mo [8] и Ti-B [4].

Рассмотрим это влияние подробнее. При кристаллизации сплавов в поле УЗК наблюдается изменение структуры слитка – в частности, существенное уменьшение размеров зерен, как основы сплава, так и интерметаллических включений. В отсутствии внешних полей энергия активации гомогенной кристаллизации имеет вид [12]

$$E_n = 16\pi\sigma^3 / (3\Delta G_v^2),$$
 (3)

где ΔG_v – изменение энергии Гиббса при кристаллизации в расчете на единицу объема.

В акустической волне имеется давление *P*_a, и при возникновении кавитации под действием УЗК, когда *P*_a превышает внутреннее давление в жидкости *P*₀, происходит снижение энергии активации зародышеобразования [13]:

$$E_n = 16\pi\sigma^3 / \{3[\Delta G_v + (P_a - P_0)]^2\} , \qquad (4)$$

Микроскопическое (физическое) воздействие УЗК на кристаллизующийся расплав может привести к изменению фазового состава твердого продукта, что наблюдалось экспериментально [4]. Это связано с тем, что в жидких сплавах имеются кластеры – группы атомов с ближним порядком, которые являются предзародышами при гомогенной кристаллизации. Строение и состав кластеров зависит от температуры и состава сплава и может изменяться под действием внешних факторов [14]. Эти изменения под влиянием УЗК в расплаве, кристаллизующемся в волне СВС, может изменить «конкуренцию» между образующимися зародышами разных фаз в неравновесных условиях, типичных для СВС-процессов, что неизбежно приведет к снижению тепловыделения брутто-реакции Q по сравнению со случаем отсутствия УЗК и, соответственно, к уменьшению температуры горения.

В связи с вышеизложенным, совместное действие таких физических факторов,

как понижение эффективной энергии активации горения *E* из-за уменьшения *E*_n и уменьшение тепловыделения *Q* вследствие изменения кинетики зародышеобразования конкурирующих фаз, может привести к снижению скорости горения – см. формулу (2).

Заключение. В данной работе предложена концепция разделения влияния УЗК на СВС на тепловое (макроскопическое), связанное с охлаждением образца из-за вынужденной конвекции окружающего газа, и нетепловое (микроскопическое), заключающееся в изменении условий кристаллизации твердого продукта вследствие ультразвукового капиллярного эффекта и воздействия акустического давления на энергию активации гомогенного зародышеобразования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д.А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

2. Свойства элементов: Справ. / Под ред. М.Е.Дрица. – М.: Металлургия, 1985, 672 с.

3. Л.Н. Лариков, Ю.Ф.Юрченко. Структура и свойства металлов и сплавов. Справ. – Киев: Наукова думка, 1985. – 437 с.

4. В.В. Клубович, М.М.Кулак, Б.Б.Хина. Особенности формирования объемных пористых систем при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Бориды // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64. – № 1. – С. 14-24.

5. A.S. Mukasyan, A.S.Rogachev. Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures // Progr. Energy & Combust. Sci. – 2008. – V. 34. – P. 377-416.

6. Л.П. Питаевский, Е.М.Лифшиц. Физическая кинетика. – М, Наука, 1980.

7. В.В. Клубович, М.М.Кулак. Структурообразование тугоплавких соединений титана, получаемых методом СВС при ультразвуковых воздействиях // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2013. – № 3. – С. 80-100.

8. B.B. Khina, M.M.Kulak. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material "TiC-metallic binder" // J. Alloys & Compounds. – 2013. – V. 578. – P. 595-601.

9. Б.Б. Хина, М.М.Кулак, В.В.Клубович. Применение Calphad-подхода для термодинамического расчета адиабатической температуры СВС в системе титан-бор // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2019. – № 2. – С. 150-162.

10. Е.А. Некрасов, Ю.М.Максимов, М.Х.Зиатдинов, А.С.Штейнберг. Влияние капиллярного растекания на распространение волны горения в безгазовых системах // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14, № 5. – С. 26-32.

11. В.Г. Левич. Физико-химическая гидродинамика. - М.: Физматгиз, 1959.-699 с.

12. J.W. Mullin. Crystallization, 4th edition. - Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2001. - 594 pp.

13. C. Virone, H.J.M. Kramer, G.M. van Rosmalen, A.H.Stoop, T.W.Bakker. Primary nucleation induced by ultrasonic cavitation // J. Cryst. Growth. – 2006. – V. 294. – P. 9-15.

14. Boettinger W.J., Banerjee D.K. Solidification. In: Physical Metallurgy, 5th edition / Ed. by D.E. Laughlin and K. Hono. - Elsevier, 2014, v.1, p.639-849.

ИНВАРИАНТЫ

Короткевич С.В.

РУП «Гомельэнерго», г. Гомель, Республика Беларусь, e-mail: korotsv@tut.by

В работах [1–3] убедительно показано, что кинетика формирования, эволюции и разрушения поверхностного слоя металла протекает в соответствии с энергетической выгодностью или в более широком значении в соответствии с принципом наименьшего действия. Последнее обуславливает поиск и установление инвариантов кинетики структурных преобразований поверхностных слоёв металлов при различных внешних воздействиях: ультразвук, прокатка, трибонагружение и т.д.

Исследовался поликристаллический никель чистотой 99,99 %. Образцы в виде тонких дисков размером 5 х 0,1 мм² перед фрикционными испытаниями электролитически полировали для формирования одинаковой гладкой поверхности 11 класса шероховатости и затем отжигали в вакууме 0,133 мПа при 973 К в течение ≈ 14,4 кс. Трение поверхности никеля по молибдену проводили на машине трения AE-5 по схеме палец (Ni)-диск (Мо) при контактном давлении ≈ 84 кПа и линейной скорости ≈ 0,5 м/с. В качестве смазочной среды использовали пластичный смазочный материал ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 21150-75). Средняя объёмная температура образца не превышала ≈ 40° С.

Электронномикроскопические исследования проводили в ΓЦ "БЕЛМИКРОАНАЛИЗ". Электронномикроскопические получены СНИМКИ на просвечивающем электронном микроскопе H-800 (Hitachi, Япония) и микроскопе ЭМВ -100АК методом тонких фольг на "просвет". Фольги получали путём одностороннего электролитического утончения дисков с противоположной стороны от поверхности струйного полирования, трения на установке оснащённой чувствительным фотодиодным мостом, позволяющим контролировать прозрачность участков на глубине ≈ 0,1 мкм от поверхности трения. Плотность дислокаций определяли по микрофотографиям методом взаимно перпендикулярных секущих.

АСМ изображения поверхности получены с использованием сканирующего зондового микроскопа NT-206 производства ОДО "Микротестмашины".

Уширение линии ферромагнитного резонанса (ФМР) образцов никеля регистрировалось с использованием разработанной и автоматизированной установки.

На рис. 1 представлена кинетика уширения линии ФМР (Δ H) и изнашивания (I) поверхности никеля в результате многоциклового и малоамплитудного контактного взаимодействия в среде ПАВ, содержащихся в смазочном материале ЦИАТИМ-201. В работе [1] убедительно показано, что в области III рис. 1 в результате снижения на порядок уровня энергии активации процессов формирования элементов дефектной структуры на всех структурно-масштабных уровнях деформации происходит аморфизация поверхностного слоя никеля. Материал обладает особыми свойствами: высокой плотностью структурных дефектов: расщеплённых дислокаций ($\rho \approx 1.10^{18}$ м⁻²), дисклинаций с дискретными границами разориентации, пор, атом-вакансионных структурных состояний, двойников, точечных дефектов и т.д.; локальным градиентом ориентации границ структурных элементов $\chi \approx 1 \div 3$ град/нм; высокими величинами напряжений, сопоставимыми и превышающими модуль упругости кристаллической решётки никеля ($\approx 2.10^{11}$ Па); сквозной (трубчатой полых дислокационных ядер) диффузией в полях высоких градиентов локальных напряжений; динамичекой микрорекристаллизацией; высокой скоростной чувствительностью в условиях

аморфизации и квазивязкого механизма их разрушения; снижение периода изменения прочностных свойств поверхности никеля в ≈ 8 раз.





Выявлены основные фундаментальные закономерности формирования и кинетики деформационных дефектов на нано-, микро-, мезо- и макромасштабных уровнях пластической деформации поверхностного слоя никеля, что определяет основные механизмы деформации при упрочнении и разрушении поверхности металлов при внешних воздействиях (прокатка, трибонагружение и др.), а именно:

 установлена обратно пропорциональная зависимость между плотностью дислокаций и интенсивностью разрушения поверхностного слоя никеля. Выполняется выражение [1–3]:

$$\rho \cdot I = const \,, \tag{1}$$

где ρ – плотность дислокаций, I – объёмная интенсивность изнашивания, const ≥ 0;

• скорость увеличения и снижения плотности дислокаций при трибонагружении определяется предварительно сформированной при закалке или прокатке структурой и разориентировкой внутренних границ раздела, где скорость увеличения плотности дислокаций при упрочнении поверхностного слоя никеля определяет и скорость снижения плотности дислокаций, и, соответственно, релаксации напряжений деформации для одного и каждого цикла изменения прочностных свойств (рис. 1). Экспериментально установлено, что увеличение скорости упрочнения (коэффициент К₁) обуславливает и увеличение скорости релаксации напряжений (коэффициент K₂) в поверхностном слое никеля. Выполняется выражение [1–3]:

$$\frac{K_1}{K_2} = const , \qquad (2)$$

где K = $\Delta H/\Delta t$ и 0 ≤ const ≤ 1;

• масштабная инвариантность локальной кривизны кристаллической решётки поликристаллического никеля на всех структурных уровнях деформации. Выполняется выражение [3]:

$$\chi_{ij}(10^{-n} \cdot x_1; 10^{-n} \cdot x_2; 10^{-n} \cdot x_3) = 10^n \chi_{ij}^{o}(x_1, x_2, x_3),$$
(3)

где *x_i* – координаты трёхмерного пространства, *x_{ij}* – тензор кривизны кристаллической решётки Ni в состоянии после отжига, n = 0, 1, 2, 3, 4;

• здесь необходимо добавить инвариант или условие сплошности материала, установленный и описанный в работе В.Е. Панина [4], а именно:

$$\sum_{i=1}^{N} Rot Ji = 0 \tag{4}$$

где J_i – потоки дефектов на i-м структурно-масштабном уровне. В этих условиях в материале компенсируются все моментные напряжения и кристаллическая решетка сохраняет свою трансляционную инвариантность. Существуют и другие инварианты, поиск которых требует дальнейшей тщательной и системной проработки.

• анализ экспериментальных данных показывает, что в области Ш сильно неравновесной деформации рис. 1, зернограничное скольжение определяет увеличение площади пористости материала и, как следствие, интенсивности его изнашивания. Должно выполняться выражение:

$$\frac{I}{S} = const, \tag{5}$$

где I – объёмная интенсивность изнашивания, S – суммарная площадь пор и 0 ≤ const. Необходимо проводить дальнейшие исследования новых свойств материала в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич С.В. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Структурномасштабные уровни деформации и свойства границ раздела в металлах» / Короткевич С.В. – Минск: БГУ, 2021. – 54 с.

2. Korotkevich S.V. The Principle of Least Action and Invariants / S.V. Korotkevich // Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration: proc. of International Conference. – Beijing, PRC, China, 31 March 2022. – Part 2: Participants, reports in English, p. 34–42.

3. Korotkevich S.V. Multiscaling of Lattice Curvature of the Nickel, Scientific Research of the SCO Countries: Synergy and Integration: proc. of International Conference, Beijing, PRC, China, 20 April 2022, Part 1: Participants, reports in English, p. 174–182.

4. Панин В. Е. Роль локальных наноструктурных состояний в пластической деформации и разрушении твердых тел / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, А. В. Панин // Физ. мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 5. – С. 5–18.

ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НЕСОВЕРШЕННОЙ 1D-СВЕРХРЕШЕТКЕ

Безус Ю.А., Румянцев В.В., Федоров С.А.

Государственное бюджетное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк, ДНР, Российская Федерация paladyan0108@yandex.ru

Исследования распространения звука в веществе, как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях, занимают сегодня видное место при решении многих прикладных задач, таких, например, как снижение уровня нежелательных звуков (борьба с шумом), поиск способов выделения полезных звуковых сигналов, а также решение проблемы акустического обнаружения объектов (эхолот) [1-3].При разработке и создании акустооптических устройств активно применяются кристаллы с особыми оптическими и акустическими свойствами. В их число входят монокристаллы парателлурита TeO₂, Hg₂Br₂ и т.п., обладающие сильной зависимостью упругих свойств от направления распространения акустической волны в кристалле

[4] Угол акустического сноса (угол между векторами фазовой и групповой скоростей звуковой волны) таких материалов достигает рекордно больших значений, а значения фазовых скоростей упругих волн в данных материалах вдоль определенных направлений являются минимальными.

Большинство работ по акустооптике посвящены созданию новых периодических искусственных анизотропных структур, варьирование свойств которых зависит от поставленных задач.

В настоящее время имеется значительное число работ [1-2, 5-6 и др.], посвященных расчетам спектров электромагнитных и акустических возбуждений в сверхрешетках. Заметим, что реальные акустические сверхрешетки – это неидеальные системы. Распространенным методом расчета нормальных мод в неупорядоченных сверхрешетках со случайным распределением структурных дефектов по всему объему, является приближение виртуального кристалла.

Особый интерес представляют исследования влияния пространственной дисперсии на распространение акустических возбуждений в нецентросимметричных кристаллических структурах, которая обусловливает акустическую активность таких сред [6].

При распространении плоскополяризованной поперечной волны в направлении акустической оси пространственно диспергирующей кристаллической среды наблюдается явление акустической активности – поворот плоскости поляризации акустической волны.

Акустическая активность была экспериментально обнаружена в кристаллах кварца, а также было выявлено что при распространении поперечных акустических волн вдоль акустических осей эффект акустической активности проявляется таким же образом, как и оптическая активность. Экспериментально акустическую активность исследовали лишь у ограниченного ряда кристаллов в связи с тем, что это явление имеет схожие характеристики с упругой анизотропией. Поэтому для наблюдения акустической активности требуется строгая ориентация кристалла вдоль акустической оси [4].

Тем не менее, очевидно, что при толщинах слоев многослойника, значительно больших характерных масштабов пространственной дисперсии, расчет соответствующих величин может быть выполнен приближенно, если рассматривать вклад каждого слоя в акустическую активность как независимый. Это означает, что для нахождения исследуемого удельного угла вращения $\varphi(\omega)$ плоскости поляризации достаточно знания лишь слоевых удельных углов вращения и концентрации инородных слоев (при их наличии).

Расчет характеристик акустических возбуждений, распространяющихся в несовершенном 1D фононном кристалле, проведем в рамках развитого ранее подхода 52

[1-2]. При этом методика [1] применяется для исследования аналогичной системы плоскопараллельных слоев, но с анизотропными примесными слоями, отличающимися упругими характеристиками.

Полагаем, что в данной слоистой структуре все акустические оси параллельны друг другу. В соответствии с феноменологическим подходом [3], угол поворота плоскости поляризации акустической волны в неидеальной топологически упорядоченной 1D сверхрешетке, состоящей из *N* элементарных ячеек, описывается следующим выражением:

$$\varphi(\omega) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{\alpha=1}^{\sigma} \varphi_{n_{\alpha}}(\omega) a_{n_{\alpha}}$$
(1)

Полагаем, что количество ячеек *N* достаточно велико (чтобы можно было проводить конфигурационное усреднение).

В (1) $a_{n_{\alpha}}$ и $\varphi_{n_{\alpha}}(\omega)$ – конфигурационно зависимые соответственно, толщина -го слоя *n*-й элементарной ячейки и удельный угол вращения плоскости поляризации акустической волны частоты ω, σ – число слоев элементарной ячейки.

На основе приведенной выше теории рассмотрим конкретную модельную двухподрешеточную систему, состоящую из слоев парателлурита (первая подрешетка) и слоев -кварца – вторая подрешетка, которая варьируется как по составу (с замещением на слои парателлурита, концентрация такого рода дефектов C_C), так и по толщине (концентрация таких дефектов C_T).

Полагаем, что в идеальном случае толщина слоев обеих подрешеток одинаковая. Учтем также, что удельное вращение плоскости поляризации упругой волны $\varphi_1^{(1)} = \varphi_2^{(2)}$ в направлении акустической оси в слоях парателлурита составляет 913град/см при 30МГц, что более чем в 8000 раз превышает ту же величину в слоях - кварца в направлении оси [4], благодаря более сильной анизотропии упругих свойств и меньшей скорости упругих волн в кристалле парателлурита [4] по сравнению с кварцем.

В результате расчетов получена концентрационная зависимость угла вращения плоскости поляризации упругой волны в исследуемой неидеальной 1D-сверхрешетке:

$$\Phi(\omega, C_C, C_T) = \frac{\langle \varphi(\omega) \rangle}{Na_1^{(1)}} = \varphi_1^{(1)}(\omega) \left[1 + C_C \frac{a_2^{(1)}}{a_1^{(1)}} + C_C C_T \left(\frac{a_2^{(2)}}{a_1^{(1)}} - \frac{a_2^{(1)}}{a_1^{(1)}} \right) \right]$$
(2)

На Рисунке 1 представлены три варианта поверхностей концентрационной зависимости $\Phi(\mathcal{C}_{\mathcal{C}},\mathcal{C}_{T})$ для конкретных значений параметров: при $\frac{a_{2}^{(2)}}{a_{1}^{(1)}} = 1$ для 1-й

поверхности
$$\frac{a_2^{(1)}}{a_1^{(1)}} = 3$$
, для 2-й поверхности $\frac{a_2^{(1)}}{a_1^{(1)}} = 1$ и для 3-й поверхности $\frac{a_2^{(1)}}{a_1^{(1)}} = 0.1$.

Анализ полученной в результате численного моделирования концентрационной функции $\Phi(C_C, C_T)$ указывает на возможность контролировать угол вращения плоскости поляризации акустической волны в исследуемой слоистой фононной структуре, варьируя ее состав и/или толщину слоев.



Рисунок 1 – Концентрационная зависимость угла вращения плоскости поляризации $\Phi(C_C, C_T)$ упругой волны в неидеальной 1D-сверхрешетке.

В частности, представленные на Рисунке 1 поверхности $\Phi(C_C, C_T)$ указывают в целом на рост величины угла вращения с увеличением концентраций C_C, C_T указанных дефектов структуры. Из выполненных выше расчетов следует, что для конкретных оценок влияния дефектов [5-6] важен также учет размерных параметров таких, например, как в рассмотренной в данной работе модельной фононной структуре: $a_2^{(2)}/a_1^{(1)}, a_2^{(1)}/a_1^{(1)}, a_2^{(1)}/a_1^{(1)}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Румянцев, В.В. Численное моделирование акустических возбуждений в неидеальной 1D сверхрешетке [Текст] / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, К.В. Гуменник // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60. – №3. – С. 327-331.

2. Румянцев, В.В. Акустические возбуждения в неидеальной 1D сверхрешетке с анизотропными примесными слоями [Текст] / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, Ю.А. Паладян // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. – 2021. – №5. – 47. – С. 11-16.

3. Сиротин, Ю.И. Основы кристаллофизики [Текст] / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. – М.: Наука, 1975. – 680 с.

4. Крячко, А.Ф. Акустическая активность в кристалле парателлурита [Текст] / А.Ф. Крячко, А.Р. Бестугин, О.В. Шакин // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2017. – №4. – С. 12-14.

5. Румянцев, В.В. Взаимодействие электромагнитного излучения и легких частиц с несовершенными кристаллическими средами [Текст] / В.В. Румянцев. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 347 с.

6. Исследование акустических возбуждений в неидеальной фононной 1Dсверхрешетке [Текст] / В.В. Румянцев, С.А. Федоров, Ю.А. Паладян и др. // ФТВД. – 2021. – Т. 31. – №1. – С. 46-57.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРО- И СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КАК МЕХАНИЗМА ИНИЦИИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Ефремов Д.В., Банникова И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия e-mail: efremov.d@icmm.ru

Изучение механизмов инициирования кавитационных эффектов (гидро- и сонолюминесценции) и эрозионного разрушения при разработке методов и средств комплексной диагностики гребных винтов, узлов трения в конструкциях перспективных газотурбинных двигателях (ГТД), в насосах высокого давления, и создание устройств регистрации стадийности кавитационного разрушения при оценке ресурса ГТД по техническому состоянию, является проблемой, на решение которой направлена настоящая работа. В работе проводится экспериментальное исследование (наблюдение и регистрация) явлений гидро- и сонолюминесценции в интенсивных гидродинамических потоках для понимания природы механизмов кавитационной эрозии и акустических эффектов.

Под гидролюминесценцией понимается эффект эмиссии света жидкостью, возникающей в интенсивных гидродинамических потоках. Условно выделяют два физических процесса: сонолюминесценция (СЛ) и гидролюминесценция (ГЛ). Существует две основные теории возникновения ГЛ – «тепловая» и «электрическая». В основе «тепловой» теории лежит предположение, что источником свечения является образовавшийся плазменный сгусток со средней температурой 10⁴ К, необходимой для испускания излучения. Эмиссия света при СЛ происходит при схлопывании кавитационных пузырьков, вызванных гидродинамическими эффектами. Отмечается, что механизм ГЛ, в отличие от СЛ, существенным образом зависит от наличия стенок канала [1-4].

В лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН создана экспериментальная установка для исследования явлений ГЛ и СЛ в узком канале. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1, где цифрами показано: 1 – рабочий канал диаметром 0,6 мм и длиной 5 мм; 2 – высокоскоростная видеокамера PHOTRON FASTCAM, фотоумножитель, датчики акустической эмиссии для регистрации и наблюдения явлений и эффектов ГЛ и СЛ; 3 – запорный вентиль; 4 – манометр; 5 – гидроаккумулятор; 6 – асинхронный электродвигатель; 7 – частотный регулятор; 8 – шестерёнчатый гидравлический насос высокого давления (до 210 атм); 9 – бак с гидравлическим маслом.

Наблюдение и регистрация явлений ГЛ и СЛ осуществлялось на гидравлическом масле MOBIL DTE-25 (динамическая вязкость $\eta = 0,04$ Па \Box с) в диапазоне градиентов давления $\nabla P \sim 0,7 - 5$ ГПа/м, скорость деформации в приграничных слоях $\dot{\varepsilon} > 10^5 - 10^7 c^{-1}$. Видеокадр наблюдения явления ГЛ и СЛ, полученный с помощью высокоскоростной камеры, показан на рисунке 2а. В узком канале наблюдается менее интенсивное свечение – ГЛ, ассоциируемая с коллективным сдвигом групп молекул. При выходе жидкости из узкого канала в диффузор наблюдается явление СЛ (за счет образования и схлопывания кавитационных пузырей). Последующее затухание люминесценции вызвано резким падением давления в рабочем канале.



Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки по исследованию явления гидролюминесценции в узком канале и геометрия самого канала.

На рисунке 26 представлена средняя частота событий *f*, регистрируемая с помощью фотоумножителя, в зависимости от градиента давления в канале. Здесь наблюдается резкое увеличение интенсивности гидролюминесценции при пороговых значениях скорости деформации ~ 10⁵-10⁶ с⁻¹, сопровождающихся качественными изменениям в механизмах диссипации.





Резкое увеличение интенсивности гидролюминесценции связывается с изменениями в механизмах переноса импульса и диссипации, обусловленными возникновением коллективных мод квазипластического сдвига. «Критический» характер такого перехода сопровождается резким изменением диссипативных свойств жидкости, проявлением которых является «гидролюминесценция» при достижении пороговых значений скоростей деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^5 c^{-1}$ в сдвиговом потоке [5-7].

Анализ экспериментальных данных по регистрации гидролюминисценции в канале, полученных с использованием фотоумножителя для различных режимов течения жидкости, включал детектирование и фильтрацию шума, исследование распределений энергий и времен следования, определение корреляций потока событий в терминах времен следования.

Статистическая обработка данных обнаруживает переключение потока событий со случайного на коррелированный и обратно при изменении градиента давления. Возникновение корреляций в сигналах люминесценции связывается с формированием коллективных автосолитонных мод сдвига и подчинением динамики течения новому механизму переноса импульса, ассоциируемому с квазипластическими механизмами переноса импульса (Gapped Momentum States) [8].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Механизмы переноса импульса и диссипации в конденсированных средах (жидкостях и твердых телах) при интенсивных воздействиях в условиях множественных метастабильных состояний, индуцированных дефектами», соглашение № С-26/562 от 23 марта 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков Д.А., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. Измерение и анализ спектра гидролюминесценции// Письма в ЖТФ, 2012, Т. 38, Вып. 2, С. 53 – 57.

2. Колдамасов А.И. Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости // ЖТФ, т. 61, вып. 2, с. 188 – 190, 1991.

3. Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Свечение жидкости в тонких диэлектрических каналах // «Физико-химическая кинетика в газовой динамике», т. 5,2007.

4. Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками // «Механика жидкости и газа», № 3, с. 114 – 119.

5. Sakharov A.D. Vacuum quantum fluctuation in curved space and the theory of gravitation // Sov. Phys. Dokl., - 1968. - V. 12. - P. 1040-1045.

6. Swegle J.W., Grady D.E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // J.Appl.Phys., – 1985. – V. 58, No. 2. – P. 692. https://doi.org/10.1063/1.336184

7. Naimark O.B. Nonequilibrium structural transitions as a mechanism of turbulence // Sov.Tech. Phys. Lett., – 1997. – V. 23, No. 7. – P. 529-531.

8. Baggioli, M., Vasin, M., Brazhkin, V., Trachenko, K., 2020. Gapped momentum states // Physics Reports, – 2020. – V. 865. – P. 1–44.

ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРОЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЙ ДЕФЕКТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 6-10 кВ И 6-35 кВ

Киприянов Д.А., Дробышев В.К., Романова В.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия, kipriyn.dima1997@gmail.com

В большинстве случаев для районного распределения электроэнергии служат электрические сети 6–10 кВ. При этом в пределах крупных населенных пунктов более распространены кабельные линии (КЛ), а в малонаселенной местности – это преимущественно воздушные линии (ВЛ), не требующие значительных затрат на монтаж и обслуживание. Однако существуют случаи, когда повреждения на линиях в сетях 6–10 кВ могут вызывать серьезные проблемы с энергоснабжением, а это в свою очередь требует найти неисправности для их устранения.

Наиболее распространенное повреждение на ВЛ – однофазное замыкание «на землю» – происходит вследствие повреждения линейных изоляторов, загрязнения их сажей от пожаров и промышленных выбросов, обрыва проводов, падения на провода деревьев и других посторонних предметов.

Обычно в районных электрических сетях, поскольку это установки с изолированной нейтралью, устройства релейной защиты и автоматики этих линий настроены не на отключение линии при выявлении подобных повреждений, а на «сигнал». В этом случае допускается оставлять линию под «рабочим» напряжением на время до двух часов, то есть электроснабжение потребителей не прерывается. Наличие напряжения на поврежденной линии существенно облегчает поиск мест повреждений, поскольку зачастую на ВЛ они выявляются визуально, а кроме того, повреждения изоляторов при обходе можно обнаружить «на слух» без помощи дополнительных приборов и устройств [1].

В некоторых сетях (например, в распределительных сетях промышленных карьеров, системах электроснабжения сигнализации на железных дорогах и других) работа в режиме однофазного замыкания на землю недопустима, например, по условиям безопасности обслуживающего энергоустановки персонала. В этом случае при превышении тока уставки «земляной» защиты линия мгновенно отключается, и ее включение под рабочее напряжение разрешается только после устранения повреждения и выполнения электрических испытаний. При этом выявить причины, вызвавшие отключение, можно только визуально – осмотрев всю линию. Время отыскания повреждений зависит от протяженности линий, наличия отпаек, количества персонала аварийных бригад и транспортной доступности линий. Кроме того, при снятом напряжении поиск повреждений опорных и подвесных изоляторов а в некоторых случаях практически невозможен. затруднителен, Методы дистанционного обнаружения и локализации мест замыканий на землю от питающих подстанций в настоящее время недостаточно проработаны. Поэтому поиск таких повреждений выполняется путем последовательного секционирования линий с проверкой сопротивления изоляции мегоомметром, что связано со значительными трудозатратами, а кроме того, может быть недостаточно эффективно для устранения неисправностей [2].

В этом случае на помощь энергетикам приходят средства дистанционного контроля изоляции. В настоящее время для контроля изоляции высоковольтных устройств используются три основных метода:

- инфракрасный (тепловизионный);

- электронно-оптический;

- ультразвуковой.

Первые два метода точны и информативны, но их применение (особенно для линейных установок класса напряжения 6–35 кВ) имеет ряд существенных ограничений. Во-первых, оба этих метода связаны с приобретением дорогостоящего

оборудования и высокой квалификацией персонала, во-вторых, эффективность их применения существенно зависит от погодных условий и времени суток: поиск неисправностей в дневное время при солнечном освещении практически невозможен.

Таким образом, для предприятий, обслуживающих небольшой район электрических сетей 6–110 кВ протяженностью до сотен километров, экономически наиболее оправданно использование ультразвуковых средств контроля, одним из которых является прибор «Ультраскан-2004» (рисунок 1).



Рисунок 1 – Ультрозвуковой прибор «Ультраскан-2004»



Рисунок 2 – Поиск неисправностей с помощью ультразвукового прибора «Ультраскан-2004»

При довольно низкой цене прибор позволяет с достаточной точностью локализовать место повреждения и измерить уровень сигнала утечки, что, в свою очередь, дает возможность оценить степень опасности каждой выявленной неисправности.

Поиск неисправностей (рисунок 2) может выполняться двумя способами:

- превентивно, то есть путем проведения регулярных плановых обследований линий в целях предупреждения неисправностей;

- место повреждения изоляции обнаруживается при подаче напряжения на поврежденный участок от испытательных установок либо от РУ подстанций (при

возможности включения линии с выведенной защитой от однофазного замыкания на землю).

Прибор оснащен как оптическим, так и лазерным визиром для локализации места повреждения по условию поиска максимального уровня сигнала. Это позволяет точно определять источник сигнала с расстояния до 15 м в любую погоду и в любое время суток. Оптический визир, представляющий собой зрительную трубу с 4-кратным увеличением, кроме своей основной функции наведения на объект измерения позволяет более тщательно разглядеть видимые дефекты изоляции линии. Следует заметить, что при рабочем напряжении 6–35 кВ наличие «чувствительной» для прибора утечки по изоляции устройств электроснабжения свидетельствует о снижении надежности их изоляции, так как для изоляции этого класса напряжения несвойственно явление «коронирования», нормальное для линий выше 110 кВ.

Кроме локализации места повреждения прибор позволяет оценить его характер: оператор может не только отличить на слух «коронирование» по поверхности от начавшихся внутренних частичных разрядов, но и оценить основную спектральную составляющую сигнала с помощью встроенного в прибор спектроанализатора. В частности, замечено, что для повреждения изоляции характерное значение основной спектральной составляющей соответствует 100 Гц. Встроенный спектроанализатор также позволяет отбросить при обследовании сигналы от механических источников (например, вибрации проводов и т. д.). Кроме того, существует возможность записать сигнал в память цифрового диктофона, входящего в комплект прибора, чтобы иметь возможность накопить базу данных различных сигналов и проводить их более тщательную обработку с помощью дополнительных программных и аппаратных средств. Наличие диктофона кроме записи сигналов позволяет вести оперативную запись сообщений оператора о дефектировке изоляторов и привязке к местности, что облегчает работу оператора – особенно в неблагоприятных погодных условиях (дождь, ветер, туман, снегопад), когда использование блокнота и ручки практически невозможно.

Вывод: Постоянное совершенствование прибора, тесное сотрудничество разработчиков со специалистами компаний-потребителей в настоящее время вывели «Ультраскан-2004» на мировой конкурентный уровень. По своим измерительным характеристикам прибор не уступает импортным аналогам, а по удобству использования и цене существенно их превосходит. Судя по положительным отзывам от энергетиков ОАО «РЖД», угольных разрезов, районных электрических сетей России и Казахстана, прибор показал свою эффективность при поиске неисправностей в сетях до 110 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров О.Г. Поиск дефектов в релейно-контакторных схемах. М.: НТФ «Энергопресс», «Энергетик», 2010.

2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РКУП И УЛЬТРАЗВУКА

Аксенов Д.А.^{1,2}, Назаров А.А.³, Фахретдинова Э.И.^{1,2}, Асфандияров Р.Н.^{1,2} ¹Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа ²Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа ³Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа aksyonovda @mail.ru

Магний и его сплавы находят широкое применение медицинской, нефтяной и авиапромышленной отрасли. В медицине они обладают большим потенциалом применения в качестве материала для биоразлагаемых имплантатов за счет легкости и близкого к человеческой кости модуля упругости. В нефтяной промышленности, в частности, используется сплав системы Mg-Al-Zn для производства временных герметизирующих устройств. Для магниевых сплавов стоит задача повышения не только прочности, но и коррозионной стойкости. При этом измельчение структурного состояния приводит к увеличению не только прочности, но и скорости коррозии магниевых сплавов. В данной работе представлен подход, основанный на изменении состояния границ зерен магниевого сплава системы Mg-Al-Zn подвергнутого деформации методами экструзии и последующего РКУП посредством ультразвукового воздействия.

Образец сплава Mg-5,1Al-2,5Zn был подвергнут деформации методом экструзии с диаметра 40 мм до 16 мм с последующей деформацией по схеме РКУП с углом пересечения каналов 120° при температуре 350°С. Суммарная накопленная степень деформации составила е ≈ 2. Затем эти образец был подвергнут объемной ультразвуковой обработке (УЗО). В образце длиной 86 мм была установлена стоячая волна с частотой колебания 19,8 кГц и амплитудой 10 мкм.

Структурные исследования свидетельствуют 0 формировании после деформации структуры бимодального вида. Размер крупных деформированных зерен составил 10-20 мкм, а мелких рекристаллизованных 1-2 мкм. Доля большеугловых границ составила 72%. Постдеформационная УЗО не приводит к изменению вида структуры, однако доля большеугловых границ вырастает до 89%. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют об увеличении плотности дислокаций после деформации на порядок с 0,48х10¹⁴м⁻² до 3,62х10¹⁴м⁻². УЗО ведет к дальнейшему увеличению плотности дислокаций до 4,24x10¹⁴м⁻². Наблюдаемые структурные изменения обеспечивают рост предела прочности сплава Mq-5,1AI-2,5Zn в процессе деформации с 190 до 280 МПа. УЗО ведет к увеличению предела прочности до 310 МПа. Коррозионные испытания в концентрированной кислоте HCI показали, что глубинный показатель деформированного состояния составляет 145 мм/год, а после УЗО он изменяется в 2,5 раза– 58 мм/год и близок к показателю исходного состояния. Физическая природа такого поведения может быть связана с изменением состояния границ, а именно увеличением доли границ Σ13а, имеющих полное совпадение, а также увеличением доли двойниковых границ систем Σ15b и Σ17а.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10325). (В рамках проекта был опробован метод постдеформационной ультразвуковой обработки. Определены размеры образцов, определено окно параметров ультразвуковой обработки. Отработаны режимы подготовки образцов магния для EBSD-исследований. Определен возможный характер воздействия ультразвука на магниевую матрицу материала).

УЛЬТРАЗВУК-ОПОСРЕДОВАННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ЦИПРОФЛОКСАЦИН-ХИТОЗАНОВЫХ КОНЪЮГАТОВ И ИХ БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Егоров А.Р.¹, Критченков А.С.^{1,2}

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Россия ²Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь sab.icex@mail.ru

Фторхинолоны являются одними из самых мощных антибиотиков и часто являются крайней мерой, способной спасти жизнь больного с осложненным течением инфекционного заболевания и тяжелыми септическими состояниями [1].

Хитозан — природный биосовместимый, биоразлагаемый полимер, характеризующийся отсутствием иммуногенности, канцерогенности и токсичности [2].

Недавние исследования показали, что ультразвук опосредует ряд гетерогенных реакций хитозана, что приводит к резкому сокращению времени реакции и необходимого количества реагентов [3].



Ультразвуковая реакция хитозана с ципрофлоксацином в присутствии DCC приводит к образованию конъюгатов ципрофлоксацин-хитозан. Разработанная методика синтеза позволила эффективно использовать водонерастворимый карбодиимид ДЦК в водных средах. Разработанные конъюгаты показали высокий антибактериальный эффект.

Также мы продемонстрировали, что конъюгация ципрофлоксацина с полимерной цепью хитозана резко снижает токсичность антибиотика без потери его антибактериальной активности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-23-00021)

ЛИТЕРАТУРА

1. Suaifan G. A. R. Y., Mohammed A. A. M., Alkhawaja B. A. Fluoroquinolones' Biological Activities against Laboratory Microbes and Cancer Cell Lines // Molecules. – 2022. – V. 27, № 5. – P. 1658.

2. Varlamov V. P., Il'ina A. V., Shagdarova B. T., Lunkov A. P., Mysyakina I. S. Chitin/Chitosan and Its Derivatives: Fundamental Problems and Practical Approaches // Biochemistry (Moscow). – 2020. – V. 85, № 1. – P. 154-176.

3. Egorov A. R., Yagafarov N. Z., Artemjev A. A., Khubiev O., Medjbour B., Kozyrev V. A., Donovan Sikaona N., Tsvetkova O. I., Rubanik V. V., Rubanik V. V., Kurliuk A. V., Shakola T. V., Lobanov N. N., Kritchenkov I. S., Tskhovrebov A. G., Kirichuk A. A., Khrustalev V. N., Kritchenkov A. S. Synthesis and in vitro antifungal activity of selenium-containing chitin derivatives // Mendeleev Communications. – 2022. – V. 32, № 3. – P. 357-359.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТРИБОТЕХНИКИ

Григорьев А.Я., Мышкин Н.К.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь aygri@tut.by

Потери, связанные с трением и износом машин для промышленно развитых стран, оценивают в несколько процентов валового национального продукта, при этом из потребляемой промышленностью энергии около четверти расходуется на преодоление сил трения [1]. Трибология, будучи многодисциплинарной научной областью, объединяет усилия специалистов разных отраслей, а ее инженерная составляющая – триботехника, ставит первоочередной задачей снижение потерь на трение и изнашивание.

В современных условиях становится важным снижение вредных выбросов и акустической эмиссии подвижных сопряжений машин, а также применение экологически-чистых материалов, смазок и покрытий. Это направление в триботехнике стало актуальным в связи с общей тенденцией развития и использования «зеленых» технологий в современной промышленности, транспорте и других секторах экономики. Решение возникающих при этом задач определяет прогресс современной триботехники обеспечивая достижение целого ряда целей устойчивого развития, определенных ООН в нынешнем веке.

Одним из важных направлений в триботехнике является широкое использование полимеров для замены металлов в узлах трения и конструктивных элементах машин. Полимеры дают прямой положительный эффект снижения потерь энергии на трение, поскольку значительно снижают массу машин и механизмов. Это подтверждается все более широким применением полимерных композитов в авиакосмической и автомобильной технике.

Стойкость к коррозии и низкий коэффициент трения полимеров обеспечивают существенное снижение потерь на изнашивание. В подшипниках скольжения наибольшее распространение получили термопластичные полимеры, обладающие смазывающими свойствами. Термореактивные полимеры служат основой материалов для тормозов и сцеплений, в которых одним из главных показателей является стабильность коэффициента трения при заданном износе, а также снижение акустической эмиссии, особенно в тормозах транспорта. Наиболее важные области применения эластомеров — автомобильные шины, являющиеся одним из главных источников потерь энергии на транспорте.

Полимерные композиты, благодаря своей многофункциональности, стали областью интенсивных исследований и разработок. В настоящее время композиты триботехнического назначения с нанонаполнителями получают все более широкое распространение в сравнении с традиционными технологиями модификации полимеров. Особенно интересны полимер-силикатные нанокомпозиты, которые имеют относительно низкую стоимость благодаря использованию природного сырья.

Данные триботехнических испытаний современных полимерных композитов показывают необходимость более детальной оценки влияния скорости скольжения на их коэффициент трения и износ. В рамках концепции влияния на механизмы трения «третьего тела» это даст основу разработки моделей формирования плёнки фрикционного переноса перспективных композитов с гибридным наполнением нано- и микроразмерными добавками. Такой подход, реализованный наполнением углеродными волокнами микронных размеров, наноглин и ПТФЭ, обеспечивает синергизм их влияния на триботехнические свойства, проявляющийся в существенно, более чем в три раза, снижении коэффициента трения характеристик такого полимерного композита на основе ПЭЭК [2], в сравнении раздельным использованием этих наполнителей.

В развитии «зеленой» триботехники большое внимание уделяется и разработке смазочных материалов на основе природного сырья. До наступления XX-го века растительные и животные жиры были наиболее распространенными смазочными материалами. Развитие нефтепереработки и химических технологий синтеза присадок привели к вытеснению природных жиров и масел минеральными смазочными материалами. В конце прошлого века по требованиям экологов начались ограничения применения минеральных масел в сельском и лесном хозяйстве. Появились директивы ЕЭС по стимуляции использования растительных масел и сейчас более 150 марок смазочных масел и рабочих жидкостей производятся из растительного сырья. Показано, что растительные масла по многим показателям не уступают минеральным [3]. Они проявляют хорошие противоизносные и защитные свойства благодаря образованию трибополимерных пленок. Индекс задира этих масел зависит от свойств входящих в их состав триглицеридов и возрастает с увеличением среднего числа ненасыщенных связей в них, способствующих процессам трибополимеризации масел в зоне фрикционного контакта и образованию на трущихся поверхностях защитных пленок [3].

Фрикционные металлополимерные материалы, обладающие стабильным динамическим коэффициентом трения в широком диапазоне скоростей и нагрузок, являются основой современных решений в области создания не только требуемых технических характеристик тормозных элементов, но и комфортных условий работы персонала и уменьшения шумового загрязнения окружающей среды. Так, например, современные комплексные решения, включающие оптимизированные безасбестовые составы, заданную текстурные свойства в совокупности CO специальной высокоэнергетической обработкой поверхностного слоя, обеспечивают требуемые характеристики при существенном, более чем на 10 дБ, снижении шума при торможении [4].

Экологически-чистая триботехника в настоящее время оказывает важное влияние на достижение целей устойчивого развития промышленной и социальной сферы в различных областях человеческой деятельности. Можно с оптимизмом смотреть на достижения в использовании полимерных и смазочных материалов для снижения потерь энергии, материалов, а также экологически вредных выбросов и акустического загрязнения окружающей среды. При этом перспективными объектами исследований и разработок могут стать полимерные композиты с природными компонентами и смазочные материалы на основе природного сырья, обладающие способностью к утилизации и рециклингу.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке задания 4.2.3, НИР 1 подпрограммы «8.4 Многофункциональные и композиционные материалы» ГПНИ на 2022-2025 годы и международного проекта БРФФИ с Вьетнамом Т22BA--003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holmberg K. et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry // Tribology International. – 2017. – T. 115. – C. 116-139.

2. Характеристики нанокомпозитов на основе ПЭЭК при трении по стали / Н. К. Мышкин, G. Zhang, Д.М. Гуцев, Ф.А. Григорьев, W. Wang, G. Li // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, № 3. – С. 350–357.

3. N.K. Myshkin, A.Ya. Grigoriev, I.N. Kavaliova. Influence of Composition of Plant Oils on Their Tribological Properties // Tribology in Industry. – 2017. – Vol. 39, No. 2. – P. 207-210 DOI: 10.24874/ti.2017.39.02.07]

4. С.Н. Бухаров, А.Г. Анисович, И.И. Филатова, Т.А. Ахметов, В.П. Сергиенко, А.Я. Григорьев. Влияние обработки неравновесной низкотемпературной плазмой на динамические механические и триботехнические характеристики фрикционных полимерных композитов // Трение и износ. – 2021.Т.42, №3. – С. 225-234

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ 7075

Панченко И.А., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В., Дробышев В.К.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия, i.r.i.ss@yandex.com

Алюминиевый сплав 7075 широко применяется в авиастроении, обладает высокими показателями предела текучести и предела прочности при растяжении, высокой усталостной прочностью, хорошей вязкостью разрушения. Вырезы с различными характеристиками широко используются в авиационных конструкциях для соединения двух или более конструктивных элементов, например, О-образные пазы в заклепочных соединениях. Металловедение космических материалов развивается преимущественно в направлении усовершенствования высокопрочных алюминиевыхсплавов системы AI-Zn-Mg [1]. Целью данного исследования является изучение структуры и свойств алюминиевых сплавов марки 7075 (AI-Zn-Mg-Cu-Cr).

Для наплавки алюминия вместо углекислоты для газовой защиты был использован инертный газ, такой как аргон (Ar) и для уменьшения коэффициента трения был использован тефлоновый канал для подачи проволоки. Использование капельного переноса без короткого замыкания, было обеспечено параметрами тока струйного переноса 130-140А при диаметре проволоки 1,2 мм. Используемые режимы наплавки составили: скорость подачи проволоки 6,1 м/мин, напряжение 15,6 расход газа Ar 12 л/мин. Накопление карт, спектров профилей ЭДС осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе КҮКҮ-ЕМ6900. Исследование микротвердости было проведено с помощью микротвердомера HVS-1000. Анализ микротвердости, осуществленный методом Виккерса был проведен по ГОСТ 9450–76. Для определения параметров кристаллической структуры применялся рентгенофазовый анализ (РФА) на установке Shimadzu XRD-6000.

Приведенный на рисунке 1 рентгенофазовый анализ показал, что основные пики, обнаруженные с помощью рентгеновской дифракции, представляют собой алюминиевую фазу. Основные пики с сильной интенсивностью были обнаружены в диапазоне 20 = 48°, 57° и 85° соответственно. Кроме того, отдельные слабые пики демонстрируют наличие других фаз с выводом Zn и Al₂O₃.



Рисунок 1 – Рентгеноструктурный анализ сплава 7075

Среднее значение микротвердости составило 82,6±3,07 HV, что на 14% выше в ранее проведённых исследованиях [2]. Изменение среднего значения микротвердости связано с параметрами тока струйного переноса и режимами наплавки. Установлено, что исследуемый сплав представляет собой кристалл, образованный зернами твердого раствора на основе AI, с интерметаллидными фазами по границам зерен. СЭМ анализ показал, что в структуре имеются не совершенства, представленные в виде микропор. В местах присутствия интерметаллидов образуются протяженные прослойки, образующиеся частицами округлой формы.

Для исследования состава второй фазы была проведена рентгеновская энергодисперсионная спектрометрия (ЭДС) в разных точках случайной области исследуемого сплава. Как видно из рисунка 2, границы зерен, внутренние зерна и вторая фаза в основном состоят из Al, Zn, Mg и Cu, а также некоторых микроэлементов.



Рисунок 2 - Многослойное изображение ЭДС сплава 7075

Границы зерен, внутренние зерна и вторая фаза в основном состоят из Al, Zn, Mg и Cu, а также некоторых микроэлементов. Граница зерна на рисунке 2 (а) состоит из Zn, Mg и Cu, а также основного элемента Al. На рисунке 2 (б) в исследуемой области на границе зерна, обнаружены вторичные фазы, состоящие из Cu – 7%, Zn – 5%, Mg – 2%. Zn.

Результаты данной работы, послужат базой данных для дальнейших исследований методами современного физического материаловедения металлических материалов, получаемых проволочно-дуговым аддитивным производством и подвергнутых воздействию интенсивных импульсных электронных пучком и азотированию, проводимых для получения повышенных свойств

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10245, https://rscf.ru/project/22-79-10245/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров, В.В. Пути развития и совершенствования высокопрочных сплавов системы AI-Zn-Mg-Cu [Текст]/ В.В. Захаров, В.И. Елагин, Т.Д. Ростова, М.В. Самарина/ Науч.-техн. журн. «Технология легких сплавов»-№4, 2008, с. 7-13.

2. Исследование сплава al7075 после дуговой наплавки/ В. К. Дробышев, И. А. Панченко, А. Р. Михно [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 23–25 ноября 2022 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 2. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 158-162

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА МАТЕРИАЛЬНЫЕ СРЕДЫ

Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н. Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Российская Федерация, romangl90@gmail.com

Известно и многократно доказано, что воздействие высокоинтенсивными ультразвуковыми (УЗ) колебаниями (УЗ воздействие) всегда сопровождается нелинейными эффектами в материальных средах. К таким эффектам относятся ударные волны и кумулятивные струи при схлопывании кавитационных пузырьков, ударно-силовые воздействия при прерывистом контакте излучателя с твёрдым материалом, направленный дрейф растворённого вещества или дисперсных частиц, вихревые акустические течения, гидродинамические эффекты и взаимодействия и т. д. [1, 2] Они обеспечивают изменения структуры и свойств сред (реологические и механические свойства несущей фазы вплоть до её разрушения, фракционный состав частиц дисперсной фазы уменьшения молекулярной массы).

Таким образом, УЗ воздействие позволяет получать новые материалы или придавать известным материалам новые, уникальные характеристики (многократно увеличенные прочность, пропитывающая способность, поверхность взаимодействия, предел прочности после отверждения, сниженное содержание нежелательной примеси (например, углекислого газа в воздухе), увеличение концентрации продуктов реакции, уменьшение площади поверхности, покрытой паразитным веществом (окисел, обледение, загрязнение) и т. д.). При этом качество формируемых материалов в значительной степени определяется режимами и условиями ультразвукового воздействия.

колебаний (амплитуда Ha сегодняшний день режимы поверхности ультразвукового излучателя, частота и непрерывность или заданная прерывистость формируемых УЗ колебаний) и условия воздействия (размеры излучающей поверхности, геометрия технологического объёма, условия выведения и введения колебаний), позволяющие достичь максимальной эффективности процессов (производительности и качества продукта) подбираются экспериментальным путём индивидуально на конкретных средах с построением функций аппроксимации на основании регрессионных уравнений. Однако такой подход обладает рядом принципиальных недостатков, а именно:

– не обеспечивает достижения максимума КПД УЗ воздействия с помощью подобранных режимов и условий, поскольку не позволяет оптимизировать затраты энергии на преобразование структуры и свойств среды (энергии на разрыв межатомных и межмолекулярных связей или формирование новых связей) по отношению к вводимой энергии колебаний;

– не гарантирует стабильности экспериментально установленных оптимальных режимов и условий в течение всего времени реализации технологического процесса. Это связано с изменениями свойств и характеристик обрабатываемых сред в ходе реализации процесса;

– не позволяет прогнозировать оптимальные режимы и условия воздействия для вновь разрабатываемых процессов или обрабатываемых сред. Это обусловлено тем, что до настоящего времени не выявлены единые закономерности формирования структуры и свойств материальных сред в зависимости от режимов и условий УЗ воздействия.

По этой причине, в используемых УЗ технологических аппаратах, которые реализуют экспериментально подобранные режимы и условия, до 90% энергии теряется в виде нагрева обрабатываемой среды, что сегодня становится не

приемлемым.

В связи с этим, для решения проблемы оптимизации УЗ воздействия на системы С жидкой фазой (выявления оптимальных режимов И условий, обеспечивающих повышение КПД воздействия) необходима разработка феноменологических моделей целевого свойств изменения структуры И обрабатываемой среды и создание вычислительных технологий для анализа созданных моделей.

Поскольку свойства и характеристики конечного продукта определяют процессы, происходящие на уровне отдельных гетерогенных включений или даже на молекулярном уровне, предложенный подход к моделированию включает несколько два главных уровня детализации.

На **нижнем** уровне изучается влияние УЗ воздействия на молекулярную структуру вещества. А на **верхнем** уровне анализируются макроскопическое изменение свойств и характеристик среды с учётом влияния изменяемых свойств на распространение колебаний.

Поскольку изменение макроскопических свойств среды определяется изменением внутренней структуры среды, первоначально необходимо моделировать её изменения при заданных внешних условиях по давлению и скорости в локальных микроскопических зонах, по размеру много меньших длины УЗ волны, но значительно превышающих размер отдельного структурного элемента среды (дисперсное включение или молекулы).

Для случая, когда структурный элемент представляет дисперсное включение, математические модели взаимодействия таких включений и дробления их агломератов при изменениях скорости и давления в сплошной фазе хорошо известны и изучены. Основные механизмы взаимодействия основаны на агломерации под действием сил Осеена или Бьеркнеса, а также за счёт разности амплитуды колебательных скоростей частиц разных размеров и форм. Дробление агломератов происходит за счёт того, что суммарный момент, создаваемый градиентом давления в сплошной фазе превышает момент силы адгезии. Моделирование дробления может быть осуществлено на основании классических уравнений механики абсолютно твёрдого тела при известных тензорах инерции каждой частицы.

Когда дисперсное включение является деформируемым, в частности, газовым пузырьком, то модели поведения такого дисперсного включения разработаны только для случая ньютоновских жидкостей. На практике, практически все среды являются неньютоновскими, поскольку в них вязкость зависит не только от скорости сдвига в текущий момент времени, но и от предыстории изменения последней. Кроме того, когда речь идёт о воздействии в нестандартных условиях (например, при экстремально высоких или экстремально низких температурах), реализуются фазовые переходы жидкой фазы в пар и обратно. Для одновременного учета фазовых переходов и неньютоновских свойств жидкости необходимо использовать приближённые аналитические методы путём интегрирования уравнения Навье-Стокса для анализа системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение радиуса пузырька и массы газа, содержашегося в нём.

Моделирование воздействия изменений внешних параметров на молекулярную структуру сплошной фазы является одной из наименее развитых областей теоретических исследований влияния высокоинтенсивного УЗ на материальные среды. Проблема моделирования влияния изменения внешних параметров на молекулярную структуру среды усложняется тем, что при воздействии высокоамплитудных ударных волн, генерируемых при схлопывании кавитационных пузырьков, движение молекул не подчиняется равновесному закону, особенно когда молекулы представляют собой протяжённые и разветвлённые цепи мономерных звеньев. Поэтому необходимо прямое численное моделирование взаимодействия и разрушения мономерных цепей. При этом необходимо осуществлять распараллеливание вычислений. А поскольку задача прямого численного моделирования взаимодействия мономерных цепей требует непрерывного отслеживания элементарных актов соударения и содержит множество условных переходов (для проверки возникшего события – произошло ли соударение макромолекул между собой или произошло пересечение макромолекулой границы расчётной области), распараллеливание задачи на графическом процессоре (GPU), адаптированного к одновременному выполнению однотипных векторных операций с малым числом условных переходов, к существенному повышению скорости вычислений не приведёт. Поэтому был предложен подход к распараллеливанию задачи моделирования взаимодействия мономерных цепей на CPU с архитектурой CISC. Такой подход основан на пространственной декомпозиции расчётной области. Каждый вычислительный узел проводит расчёты ансамбля макромолекул, занимающих фиксированную подобласть пространства.

Расчёт реализуется с использованием клиент-серверной архитектуры, когда клиент выполняет расчёты в заданной подобласти пространства, а сервер осуществляет раздачу заданий клиентам и синхронизацию работы последних.

Предложенный алгоритм расчёта заключается в следующем

1. Сервер запрашивает у каждого k-го клиента минимальное время t_k, через которое произойдёт на данном CPU одно из событий – соударение мономерных цепей или смена класса мономерной цепи (с внутренней на граничную, т.е. пересекающую границу подобласти, или наоборот).

2. Поиск t_m – минимума среди всех t_k.

3. Сервер направляет m-му клиенту команду «реализовать событие». А остальным клиентам – только увеличить внутренний счётчик времени на t_m.

4. Если событие затрагивает граничную мономерную цепь для данной подобласти, обновляется информация о списке внутренних и граничных мономерных цепей на соседних клиентах, имеющих общую границу с m-ым клиентом.

Далее цикл повторяется.

Построив модели и разработав технологии вычислений процессов на нижнем уровне, далее осуществляется масштабирование полученных результатов на верхний уровень детализации модели.

Для расчёта изменения макроскопических характеристик среды, когда структурные элементы движутся одновременно со сплошной фазой (например, речь идёт о переносе растворённой фазы), используется эволюционное уравнение с конвективным слагаемым:

$$\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + (\mathbf{u}, \nabla) \mathbf{C} =$$

$$= \mathbf{F} \left(\mathbf{C}, \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x_n}, \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial x_1 \partial x_2}, \dots, \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial x_1 \partial x_n}, \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial x_2 \partial x_3}, \dots, \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial x_2 \partial x_n}, \dots \right); \tag{1}$$

где **С** – вектор характеристик среды (например, концентрации молекул разных весов), **u** – скорость движения сплошной фазы, **F** – функция изменения вектора характеристик среды, определяемая на основании аппроксимации результатов анализа нижнего уровня модели и вероятностного подхода.

Данное уравнение решается итерационным методом конечных элементов с введением слагаемого искусственной диффузии, которое обеспечивает затухание пилообразных осцилляций, обусловленных погрешностью аппроксимации. Вектор характеристик среды на следующем шаге по времени определяется на основании вектора характеристик на предыдущем шаге в соответствии с выражением.

$$\int_{V} \left(\mathbf{q}, \mathbf{C}^{(n+1)} - \varepsilon \tau \Delta \mathbf{C}^{(n+1)} \right) dV = \int_{V} \left(\mathbf{q}, \mathbf{C}^{(n)} + \tau \mathbf{F} \left(\mathbf{C}^{(n)}, \dots \right) - \tau \left(\mathbf{u}, \nabla \right) \mathbf{C}^{(n)} \right) dV;$$
(2)

где т – величина шага по времени; n – номер итерации; q – пробная вектор-функция; є – коэффициент искусственной диффузии.

Если структурные элементы являются инерционными и движутся с запаздыванием относительно движения сплошной фазы (в основном, это касается дисперсных частиц), то используется Discrete Phase Model с возможным усреднением вдоль линии тока сплошной фазы, если скорость перехода частиц с одной линии тока на другую много меньше скорости движения частиц параллельно одной линии.

Для учёта влияния характеристик среды на распространение акустических колебаний применяется итерационный процесс, аналогичный (1,2).

Предложенные и разработанные вычислительные технологии позволили выявить оптимальные режимы и условия УЗ воздействия, обеспечившие повышение энергетической эффективности процессов более чем в 1,6 раз. Это было достигнуто за счёт увеличения доли энергии колебаний, переходящей в изменение структуры среды в локальном объёме, и обеспечения равномерности колебаний за счёт оптимизации геометрии объёма.

Исследования формирования вихревых акустических течений и коагуляции дисперсных частиц выполнены за счёт гранта Российского научного фонда №19-19-00121 (<u>https://rscf.ru/project/19-19-00121/</u>). Исследования переноса растворённой фазы (углекислого газа в воде) выполнены за счёт гранта Российского научного фонда №22-29-00828 (<u>https://rscf.ru/project/22-29-00828/</u>).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аникин, В.С. Моделирование гидродинамических вихревых потоков с ультразвуковыми кавитационными процессами [Текст] / В.С. Аникин, В.В. Аникин // Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2008. – № 24.

2. Sheng, C. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles [Tekct] / C. Sheng, X. Shen // Aerosol Science and Technology. – 2007. – Vol. 41. – Iss. 1. – P. 1-13.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Оковитый В.В., Сидоров В.А., Литвинко А.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, niil_svarka@bntu.by

Введение

В настоящее время в различных отраслях промышленности существует большое количество деталей и узлов, работающих в условиях трения (шаровые и цилиндрические подшипники, скользящие токосъемники, вкладыши, подпятники, направляющие, торцевые и боковые уплотнения, шарнирные устройства и др), в которых широко используют износостойкие материалы. Они функционируют при различных условия - высоких скоростях, больших нагрузках, при наличии граничного трения или трения со смазкой, при повышенных температурах или в вакууме. Процессы коррозии, неблагоприятного воздействия изнашивания, являются главными причинами поломки металлоконструкций и деталей машин. По этим причинам в промышленности выходит из строя около 80-90% деталей. Все эти обстоятельства не дают возможности получить универсальный материал для работы в узлах трения. Возникает необходимость получения различных материалов для заданных условий работы в условиях трения. Из обзора литературы [1-8] известно, что самыми перспективными для получения износостойких плазменных покрытий, повышающих долговечность и надежность механизмов и машин, являются те материалы, которые могут выдерживать максимальные нагрузки без пластической деформации в парах трения в большом интервале эксплуатационных температур и обладающих наивысшей стойкостью при абразивном износе, способностью работать в агрессивных средах и вакууме. Наиболее перспективными для работы в таких условиях являются композиции, которые состоят из металлокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Работоспособность таких композиций обеспечивается высокими прочностными свойствами металлокерамической матрицы. Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения, равномерно материала, распределенной по всему объему создает нужный эффект самосмазываемости. Все вышеперечисленные особенности позволяют предполагать, что плазменные износостойкие порошковые покрытия найдут широкое применение в техники, как защитные, так и антифрикционные [6]. Атмосферное плазменное напыление (APS) - это действующий коммерчески доступный метод, который использовался многими исследователями для создания экономически выгодных покрытий. Использование высоких температур и плотности энергии позволяют наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как Al₂O₃, ZrO₂ и муллит, которые трудно расплавить с помощью других традиционных процессов термического напыления [7]. По сравнению с керамическим плазменным покрытием, керметные, состоящие из керамических частиц, связанных с металлическими частицами, проявляют превосходную стойкость к тепловому удару в высокотемпературной атмосфере. Кроме того, они обладают совместными преимуществами керамики и металла, такими как твердость и ударная вязкость. Кроме того, эффективное применение износостойких покрытий может быть значительно улучшено при применении последующего модифицирующего воздействия на их структуру [8]. При износостойких плазменных покрытий обработке высокоэнергетическими воздействиями их источники имеют ряд преимуществ: во-первых локальность и высокую концентрацю подводимой энергии, позволяющей воздействовать на необходимый участок сформированного износостойкого покрытия, не нарушая тем самым из-за общего нагрева всего объема его микроструктуры и требуемых свойств; во-вторых возможностью строгого управления всеми параметрами воздействий, формировать структурусоздаваемого позволяющими слоя, регулировать его
шероховатость и необходимые геометрические размеры, получать необходимые параметры износостойкости, общей пористости, твердости. Однако всегда нужно не забывать о способности высокоэнергетической модификации изменять и перераспределять остаточные напряжения в сформированном покрытии, особенно при небольших толщинах покрытия.

Оптимизация параметров нанесения плазменных покрытий из материаллов на основе оксидной керамики

В соответствии с разработанной нами методикой оптимизацию плазменного напыления порошковых покрытий на установке УПУ-3Д осуществляли по коэффициенту использования распыляемого порошкового материала (КИП). При этом учитывали также морфологию отдельных наносимых на отполированную поверхность частиц порошковых материалов после их взаимодействия с основой (подложкой) ("Splat-test") (рисунок 1). По результатам осмотра под микроскопом для аналогичных технологических режимов, что и для "Сплэт-Тест" осуществлялся процесс оптимизации на базе создания покрытий с максимальным КИП (коэффициента использования порошкового материала).



Рисунок 1 – Распыленная частица Al₂O₃-TiO₂-Ni-Cr-Al-Y на подложке (×400)

При процессе получения напыленных износостойких слоев из разработанных порошковых материалов присутствует большое количество факторов технологического процесса, влияющие на свойства создаваемых защитных покрытий. Основные факторы- скорость устройств перемещения плазменной горелки или подложки, применяемая дистанция для напыления, расход используемого плазмообразующего и транспортирующего газов, расход материала, применяемого при распылении, подводимая мощность, зависящая от напряжения и тока электрической дуги плазмотрона. Произведена качественная оптимизация всех важнейших параметров APS (плазменное напыление в условиях атмосферы) процесса создания износостойких покрытий из порошковых материалов Мо и NiCrAIITa (для создания подслоев), а также Mo-Al₂O₃-TiO₂ и NiCrAllTa-Al₂O₃-TiO₂ (для создания износостойких слоев). Она проводилась поэтапно. Первый - для фиксированных показателей тока дуги и формирующего плазму азота варьировались дистанции для создания покрытий. Второй - изменение количества формирующего плазму азота при неизменных дистанциях напыления порошкового материала и значении применяемого тока. Затем на третьем этапе для определенных постоянных значениях дистанции напыления порошкового материала и расходах плазмообразующего газа-азота мы изменяли величины подводимого тока. Для NiCrAllTa полученные режимы-подслой (ток дуги плазменной горелки – 550 А, скорость при перемещении основы V_{подп.}=300 мм/с, расход формирующего плазму азота - 45 л/мин, дистанция для формирования покрытия - 100 мм, фракционный состав порошкового материала - 40-63 мкм, расход порошкового материала - 4.0 кг/час) сформирован подсой покрытия с КИМ - 85 %. Для Мо -подслой (ток дуги плазменной горелки – 600 А, скорость при перемещении основы V_{подл.}=300 мм/с, расход формирующего плазму азота - 50 л/мин, дистанция для

формирования покрытия - 110 мм, фракционный состав порошкового материала - 40-63 мкм, расход порошкового материала - 4,0 кг/час) сформирован подсой покрытия с КИМ - 80 %.

Для NiCrAIITa-Al₂O₃-TiO₂ - износостойкий слой (ток дуги плазменной горелки – 550 А, скорость при перемещении основы V_{подл.}=300 мм/с, расход формирующего плазму азота - 50 л/мин, дистанция для формирования покрытия - 110 мм, фракционный состав порошкового материала - 40-63 мкм, расход порошкового материала - 4,0 кг/час) сформирован подсой покрытия с КИМ - 80 %.

Для Mo-Al₂O₃-TiO₂ - износостойкий слой (ток дуги плазменной горелки- 600 A, скорость при перемещении основы V_{подл}=250 мм/с, расход формирующего плазму азота - 55 л/мин, дистанция для формирования покрытия - 130 мм, фракционный состав порошкового материала - 40-63 мкм, расход порошкового материала - 4,5 кг/час) сформирован подсой покрытия с КИМ - 72 %.

значениях При указанных технологических параметров формируется микрогетерогенная структура напыленного покрытия, содержащая элементы, обеспечивающие его износостойкость (Cr_{1,12}Ni_{2,88}, α-Al₂O₃, γ-Al₂O₃, орторомбическая фаза оксида титана ТіО₂, соединения Мо). При этом, как видно из рисунка 1, достигается растекание расплавленных частиц на подложке, отсутствует их разбрызгивание и потери при соударении с подложкой.

Заключение

Выбраны оптимальные параметры нанесения плазменных покрытий из материалла на основе сплавов MCrAIYTa, армированных тугоплавкими оксидами керамики. На оптимальных режимах для NiCrAIITa (расход плазмообразующего газа (азот) - 50 л/мин, ток дуги плазмотрона – 550 A, дистанция от среза сопла до основы - 100 мм, фракционный состав порошкового материала - 40-63 мкм, расход порошкового материала - 4,0 кг/час, относительная скорость движения подложки V_n=300 мм/с) сформированы покрытия с КИМ - 85 %. Для NiCrAIITa-Al₂O₃-TiO₂ (расход плазмообразующего газа (азот) - 50 л/мин, ток дуги плазмотрона – 550 A, дистанция от среза сопла до основы - 110 мм, фракционный состав порошкового материала - 4,0 кг/час, относительная скорость движения подложки V_n=300 мм/с) получены покрытия с КИМ - 80 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants / V. Okovity // Welding production -M., 2002. - № 6. - P. 41-43.

2. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V. Okovity // J. Welding International, 2003.- vol.16, - № 11.- P. 918-920.

3. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity [et al.] // High Temperature Material Processes, 2014. -№ 18, - P. 45–62

4. Okovity, V.A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.F. Panteleenko // Processing of metals. - Novosibirsk, 2015. - № 67. - P. 46-54.

5. Okovity, V.A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity [et al.] // Science and Technology BNTU. - Minsk, - 2018. Issue 3. - P. 183-189.

6. Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz [et al.] - Minsk, 1998.

7. Vityaz, P.A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heatprotective coatings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. – Minsk, 2006.- P. 205-243, 280-300, 314-351.

8. Ilyuschenko, A.F. Plasma coatings based on ceramic materials / A.F. Ilyuschenko, V.A. Okovity, A.I. Shevtsov // Besprint. - Minsk, 2006.- 316 p.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИАГРАММА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ТИТАНА

Волков А.Е., Черняева Е.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия e-mail: lena@smel.math.spbu.ru

Акустическая эмиссия, генерируемая при деформации образцов, зависит от состояния материала, которое изменяется в результате предшествующих воздействий в режиме усталостного нагружения, ползучести, пластического деформирования и т.д. В работе [1] отмечено, что спектр сигнала, порожденного деформационным процессом, искажается при отражениях от внешних поверхностей образца, а также датчиком и усилителем аналогового сигнала. В этой работе предложено, не восстанавливая "исходный" сигнал, строить сравнительную диаграмму спектров сигналов, полученных на образцах до и после предшествующих испытаний, которая не зависит от условий распространения и регистрации сигналов. Эта диаграмма представляет собой отношение усредненных Фурье-образов зарегистрированных сигналов от "свежих" и уставших" образцов. Если уравнения, описывающие генерацию, распространение и регистрацию сигналов, линейны, то это отношение равно отношению Фурье-образов сигналов, генерированных самими деформационными процессами. Аналогичный способ "отвязки" от характеристик датчика был предложен в работах [1,2], в которых для анализа АЭ в процессе непрерывного деформирования образцов берется логарифмическая производная от амплитуды сигнала.

В [1] изучали влияние усталостных испытаний на образцы FeMn. Этот материал отличался сравнительно небольшим количеством сигналов АЭ (20 – 50 штук) при каждом уколе. В отличие от этого сплава, при индентировании образцов из титана генерируется довольно много (500 – 700) низкоэнергетических сигналов. Средние спектры сигналов АЭ и сравнительная диаграмма показаны на рис.1.



Рисунок 1а – Средний спектр мощности сигналов АЭ при индентировании в исходном состоянии. Синяя линия – сигнал, серая – шум.



Рисунок 16 – Средний спектр мощности сигналов АЭ при индентировании после усталостных испытаний. Синяя линия – сигнал, серая – шум.



Рисунок 1в – Сравнительная диаграмма спектров мощности сигналов при индентировании до и после усталостных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.Е., Черняева Е.В. О сравнении энергетических спектров сигналов акустической эмиссии, регистрируемых при индентировании разных материалов, Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов XII Международной конференции (24 – 27 октября 2022 года, Черноголовка) / под ред. Б.Б. Страумала. – Черноголовка, 176 с. – ISBN 978-5-6045956-2-6.

2. Метод определения сейсмических событий малых магнитуд в случайном временном ряду. Аглетдинов Э.А, Виноградов А.Ю. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2013, №3(25), С. 23-27.

3. A Novel Bayesian Approach to Acoustic Emission Data Analysis, E.Agletdinov, E.Pomponi, D. Merson, A. Vinogradov. Ultrasonics - 2016. - Vol. 72. - P. 89-94 https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.07.014

МАЛОГАБАРИТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АГРЕГАТ МУЗА1-8-0,8 ДЛЯ ОЧИСТКИ ФИЛЬТРОВ И ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ

Петушко И.В.

АО «КОНЦЕРН «МОРСКОЕ ПОДВОДНОЕ ОРУЖИЕ – ГИДРОПРИБОР», г. Санкт-Петербург, Россия, petushko51@yandex.ru

Малогабаритный ультразвуковой агрегат МУЗА1-8-0,8 — это уникальная специализированная ультразвуковая ванна для высококачественной очистки (мойки) фильтроэлементов и фильтропакетов всевозможных топливных, масляных, гидравлических и пневматических систем, в частности, летательных и морских (корабельных) аппаратов. Обеспечивается очистка от механических частиц, смолистых веществ, продуктов коксования и других подобных трудноудаляемых загрязнений.

Очистка производится под избыточным давлением при непрерывной циркуляции технологической жидкости и вращении фильтра. Высокое качество очистки технологической жидкости достигается благодаря созданию в устойчивой высокоинтенсивной и управляемой кавитации. Обеспечивается очистка фильтропакетов без разборки. Высокие эффективность, надежность и ремонтопригодность агрегата обеспечиваются модульным исполнением генераторного блока, при котором каждый излучатель питается от своего генератора имеющего автоматическую подстройку частоты. Основные технические характеристики агрегата приведены в Табл.1., а его внешний вид – на Рис.1.

		Табл. 1		
Nº ⊓⊓	Наименование	Норма		
1.	Питающая сеть напряжение, В	Однофазная 220		
	частота, і ц мошность. потребляемая от сети.кВА. не более	50 3.5		
2.	Количество модулей, шт.	8		
3.	Номинальная выходная мощность одного ультразвукового генератора, кВт	0,1±0,03		
4.	Суммарная мощность генераторов ультразвуковой частоты, кВт	0,8±0,2		
5.	Рабочая частота, кГц	22±1,65		
6.	Рабочий объем камеры, л	65		
7.	Рабочий объем бака, л	65		
8.	Рабочее давление камеры, Па (кГс/см²)	$(0,6-1,0) \cdot 10^5$ 0.6-1.0		
9.	Рабочая среда	Керосин ТС-1, масло АМГ-10		
10.	Температура рабочей среды, °С	25 ± 5		
11.	Время очистки одного изделия, мин, не более:	10		
12.	Максимальные размеры очищаемых изделий:			
	диаметр, мм	190		
	высота, мм	390		
13.	Продолжительность непрерывной работы агрегата, ч, не	12		
1/		65		
14.		1320x480x082		
16		130		
10.		ИЕПВ		
17.	Технические условия	443146.027TY		

В настоящее время успешно эксплуатируются десятки таких установок для чистки топливных авиационных фильтров, изготовленные по заказу Министерства обороны РФ.

Конструктивно агрегат состоит из технологического 1 и энергетического 5 блоков, жестко стянутых между собой болтами в единый агрегат (Рис.1), установленный на шасси с самоориентирующимися колесами 7, два из которых снабжены тормозами.

В технологическом блоке 1 расположены рабочая камера (камера), герметично закрывающаяся крышкой, в которой производится очистка изделий под давлением, бак для заправки и нагрева рабочей жидкости до заданной температуры с крышкой и другие узлы и системы. Прокачка жидкости приводит во вращение подвеску с очищаемыми изделиями, создает в рабочей камере избыточное давление и гидродинамические потоки, что способствует эффективному удалению загрязнений. Агрегат может работать в двух режимах: ручном и автоматическом.



1 – технологический блок; 2 – камера; 3 – бак; 4 – блоки управления; 5 – энергетический блок; 6 – генераторы; 7 – колеса.

Рисунок 1 – Малогабаритный агрегат МУЗА1-8-0,8

В энергетическом блоке 5 расположены блоки управления 4, ультразвуковые генераторы 6 и блоки питания. Исполнение источников ультразвуковой энергии – модульное. Модуль - система, состоящая из ультразвукового генератора, и подключенного к его выходу пьезокерамического преобразователя. Питание каждого пьезокерамического преобразователя от собственного ультразвукового генератора обеспечивает работу каждого преобразователя на частоте его механического

резонанса, что повышает качество очистки. Независимая работа ультразвуковых преобразователей значительно повышает надежность агрегата, так как он сохраняет работоспособность и производительность при отказе двух – трех модулей ("горячее резервирование").

Каждый ультразвуковой генератор выполнен в виде кассеты с печатными платами, имеет лицевую панель, на которой имеются светодиоды для контроля за работой, и выходной разъем ножевого типа, установленный на задней панели. При установке генератора в блок он с помощью направляющих стыкуется с ответной частью разъема в энергетическом блоке.

На лицевой поверхности агрегата имеются органы управления, технологический блок 1 имеет дверь для доступа к узлам и системам агрегата при смене технологической жидкости и обслуживании.

На задней стенке агрегата имеются разъемы для подключения сетевого кабеля, датчиков, преобразователей, насосов и болты заземления.

По желанию заказчика установка может комплектоваться приборами ПКФ (для контроля качества очистки) и УПФГ (для контроля герметичности фильтров).

По сравнению с аналогичными устройствами, предназначенными для этих целей, агрегат МУЗА1-8-0,8 имеет ряд неоспоримых преимуществ, а именно:

Высокую эффективность и качество технологического процесса очистки за счет:

- применения модульной схемы питания ультразвуковых излучателей;
- применения фокусирующих пьезокерамических излучателей обеспечивающих непосредственное излучение в рабочую жидкость;
- применения режима модуляции акустических колебаний с оптимальными параметрами;
- наличия вращения очищаемого изделия между расположенными друг напротив друга излучателями, с помощью рабочей жидкости;
- наличия избыточного давления в камере ультразвуковой очистки;
- обеспечения нагрева рабочей жидкости с использованием программируемого микропроцессорного регулятора с двумя датчиками температуры;
- автоматизации процесса очистки: осуществления качественной очистки фильтропакетов без предварительной разборки;
- наличия устройств контроля; для проверки фильтров на герметичность (УПФГ), и проверки качества очистки фильтров (ПКФ), датчика моточасов.
 Широкую область применения за счет:
- обеспечения широкого диапазона габаритов очищаемых изделий –до диаметра 190 мм и высоты - 390 мм;
- наличия большого количества держателей для различных типов очищаемых изделий;
- применения дополнительных удобств в работе, используя имеющиеся, как правило, в наличии такие рабочие жидкости, как керосин TC-1 и масло AMГ10 и отсутствие необходимости закупки специальных моющих веществ, наличие двери для обслуживания агрегата при смене рабочей жидкости.
 Повышения надежности посредством:
- применения модульной схемы, позволяющей осуществить резервирование излучаемой в рабочую жидкость ультразвуковой мощности;
- наличия значительного комплекта ЗИП, включающего не только запасной излучатель, плату генератора, большой набор инструментов, но и средства защиты
- наличия высококачественной упаковки (металлический контейнер) для любого вида транспорта.

МАЛОГАБАРИТНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УСТАНОВКА МУЗУ1-0,16 ДЛЯ ОЧИСТКИ МИКРОКАПИЛЯРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Петушко И.В.

АО «КОНЦЕРН «МОРСКОЕ ПОДВОДНОЕ ОРУЖИЕ – ГИДРОПРИБОР», г. Санкт-Петербург, Россия, petushko51@yandex.ru

МУЗУ1-0,16 - это уникальная специализированная ультразвуковая ванна для высококачественной очистки (мойки) в полевых и стационарных условиях микрокапилярных изделий, фильтропакетов (ф/п) и фильтроэлементов (ф/э) топливных, масляных, гидравлических и воздушных систем летательных и морских аппаратов от механических частиц, смолистых веществ и продуктов коксования в рабочей жидкости – авиационном керосине в полевых и стационарных условиях в соответствии с «Инструкцией № 63 по очистке ф/п и ф/э в условиях эксплуатации и ремонта авиационной техники» (редакция 6-2005) В исключительных случаях допускается использование в качестве рабочей жидкости масла АМГ-10 с предварительным подогревом до температуры 60 - 70°С.

Характеристики установки представлены в таблице, а ее внешний вид – на рис.1.

Табп 1

570×540×255
30
27
220±0.22
0.4
22±1.65
авиационный керосин, масло АМГ-10
ø105x200
ТУ 3444-009-04682574-05

Очистка производится под избыточным давлением (1,0±0,2) кг/см² при непрерывной циркуляции технологической жидкости и вращении фильтра. Жидкость подается на изделие струями, способствующими более быстрому удалению загрязнений с поверхности изделий. Избыточное давление и струи рабочей жидкости создаются насосом через три струйных спрейера, расположенных на боковой поверхности технологической камеры.

Очистка ф/п может обеспечиваться без разборки. Установка переносится за две ручки 8, расположенные на передней и задней стенках, или на ремне, закрепляемом за проушины 9 карабинами. Откидная панель 7 служит для контроля герметичности узлов гидравлической схемы и расположенных внутри насоса, распределительного и сливного коллекторов и трубопроводов.

Установка состоит из двух основных узлов – технологического и энергетического. Технологический узел включает в себя технологическую камеру, циркуляционный бак, насос, распределительный коллектор, сливной коллектор с кранами и штуцером для слива рабочей жидкости из технологической камеры и циркуляционного бака.

Технологическая камера представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость с откидной крышкой. На дне камеры установлен пьезоэлектрический преобразователь. Крышка камеры снабжена винтовым запорным устройством. В

рабочем положении крышка уплотняется резиновым кольцом. Циркуляционный бак выполнен из листовой нержавеющей стали в виде прямоугольной емкости, приваренной к дну поддона.



 технологический узел, 2 – энергетический узел, 3 – листы обшивки, 4 – манометр, 5 – счетчик моточасов, 6 – сливные краны и штуцер, 7 – откидная панель, 8 – ручка для переноски, 9 – проушина для переноски, 10 – фиксатор откидной панели.

Рисунок 1 – Установка МУЗУ1-0,16

На дне бака закреплен быстросъемный технологический фильтр для тонкой очистки рабочей жидкости.

Внутри бака, в его верхней части, установлен гидравлический дроссель, предназначенный для регулирования рабочего давления в технологической камере. Циркуляционный бак закрывается крышкой с резиновым уплотнением. В верхней части бака установлена съемная фильтрующая сетка, предназначенная для грубой очистки рабочей жидкости. Насос обеспечивает циркуляцию рабочей жидкости и необходимое давление в технологической камере. Распределительный коллектор служит для подачи рабочей жидкости в технологическую камеру через три спрейера. Ф/э и ф/п, подлежащие ультразвуковой очистке, устанавливаются в технологической камере на специальных держателях (Рис. 2).



Рисунок 2 – Держатели для фильтроэлементов и фильтропакетов

Энергетический узел обеспечивает питание электроакустического преобразователя, насоса и вентилятора охлаждения. На лицевой панели энергетического узла установлены тумблеры ПИТАНИЕ, НАСОС, ГЕНЕРАТОР, соответствующие индикаторные лампы и предохранители, а также разъем для подключения установки к источнику питания постоянного тока напряжением 27В.

По желанию заказчика установка может комплектоваться приборами: ПКФ (для контроля качества очистки) и УПФГ (для контроля герметичности фильтров).

Установка МУЗУ1-0,16 обеспечивает высокие эффективность и качество технологического процесса очистки за счет: применения фокусирующего излучателя, обеспечивающего непосредственное излучение в рабочую жидкость; акустических применения режима модуляции колебаний С оптимальными параметрами; наличия вращения очищаемого изделия между расположенными друг напротив друга излучателями, с помощью рабочей жидкости; наличия избыточного давления в камере ультразвуковой очистки; обеспечения нагрева рабочей жидкости с использованием программируемого микропроцессорного регулятора С двумя температуры; процесса датчиками автоматизации очистки: осуществления качественной очистки ф/п без предварительной разборки; использования имеющихся. как правило, в наличии таких рабочих жидкостей, как керосин ТС-1 и масло АМГ10 и отсутствие необходимости закупки специальных моющих веществ.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ: ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ

Назаров А.А., Бачурин Д.В., Мурзинова М.А., Мухаметгалина А.А., Шаяхметова Э.Р.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г.Уфа, Россия AANazarov@imsp.ru

Ультразвуковая сварка (УЗС), являющаяся одним из способов соединения металлов в твердой фазе, широко используется для сварки тонких листов, фольг, проводов в электронике, электротехнике, автомобильной промышленности и других отраслях [1]. В последние годы, в связи с изобретением технологии ультразвуковой консолидации, представляющей собой один из методов аддитивной технологии, применения УЗС расширились в сторону создания объемных деталей и конструкций [2]. В связи с этим, исследование микроструктуры полученных УЗС соединений с помощью современных методов структурного анализа, повышение их качества и прочности становятся актуальными задачами материаловедения. Кроме того, развитие методов моделирования, позволяющих исследовать структурные перестройки в быстропротекающих интенсивных воздействиях, материалах при таких. как молекулярная динамика (МД), делает возможным выяснение механизмов образования соединений при УЗС на атомарном уровне.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований механизмов образования, структуры и свойств полученных УЗС соединений меди в рамках проекта РНФ «Исследование микроструктуры и механических свойств твердофазных соединений меди, полученных ультразвуковой сваркой», выполняемых в ИПСМ РАН.

Для реализации процесса УЗС используется экспериментальная установка, состоящая ультразвукового генератора УЗГ-10 ИЗ И магнитострикционного преобразователя ПМС-15А-18, концентратора, полуволнового сварочного волновода и пресса. На наконечнике волновода и наковальне нанесены насечки глубиной 0.4 мм и периодом 0.9 мм, обеспечивающие передачу колебаний соединяемым листам. Для сварки были использованы листы технически чистой меди М1 толщиной 0.8 мм, из которых вырезали пластины длиной 40 мм и шириной 20 мм. Сварку осуществляли при амплитуде колебаний около 17-20 мкм, усилиях прижима от 2 до 4 кН, временах сварки от 1 до 3 с. Путем сварки пластин внахлест были получены образцы для испытаний на срез, растяжением которых определялась прочность соединений на срез как отношение максимального усилия разрушения сварной точки к площади сварочного наконечника. Структуру сварных соединений исследовали в их поперечном сечении. проходящем через середину сварной точки. Микроструктуру анализировали методами сканирующей электронной микроскопии в режимах отраженных и обратно рассеянных электронов (BSE, EBSD). С помощью термопары диаметром 0.5 мм, помещенной в паз на верхней поверхности нижнего листа, измерялась температура в процессе сварки. На Рис. 1 приведены фотографии установки, сварочного инструмента, наковальни и пример полученных сваркой образцов соединений меди.

Измерения показали, что максимальное повышение температуры при УЗС за время сварки 3 с составляет в среднем 315, 225, 160 и 170°С, соответственно, при усилиях сжатия 2, 2.5, 3.0 и 3.5 кН. Зависимости усилия разрушения соединений от усилия сжатия при времени сварки t = 2 с и от времени сварки при трех значениях усилия сжатия приведены на Рис. 2а,б. Максимальная прочность на срез соединений, полученных при использованных режимах, составила величину 76 МПа. Это значение превышает большинство значений, приведенных в литературе (34-55 МПа) и уступает результату только одной работы (120 МПа [3]).



Рисунок 1 – Общий вид установки УЗС (а), сварочного инструмента и головки (б), наковальни (в) и образцов соединений меди (г)



Рисунок 2 – Влияние статической силы прижима N (а) и длительности УЗС t (б) на величину усилий разрушения образцов F, полученных УЗС

Подробно исследована связь между распределением деформации сжатия/растяжения в локальных участках соединяемых листов с относительной протяженностью сваренных участков, прочностью соединения. С помощью растровой электронной микроскопии исследованы макро- и микроструктура поперечных сечений соединений, а также поверхностей разрушения.

Полученные для УЗС меди экспериментальные данные сравниваются с результатами ранее проведенных исследований соединений никеля и титана, полученных с помощью той же установки.

Для МД моделирования процесса УЗС меди построена атомная модель, состоящая из двух блоков с полуцилиндрическими выпуклостями на соприкасающихся поверхностях, моделирующими шероховатость (Рис. 3). При моделировании к нижней части нижнего блока приложено внешнее давление, ее смещение в направлении, параллельном поверхности соприкосновения, запрещено, а к верхней части верхнего блока прикладываются синусоидальные смещения в этом направлении. Вначале под давлением блоки прижимаются друг к другу, затем верхняя половина приводится в колебательное движение с амплитудой 8 нм и частотой 2 ГГц.

Моделирование показало [4], что в процессе знакопеременных взаимных смещений блоков взаимодействие шероховатостей, их деформация приводят к генерации дислокаций, структурным изменениям, залечиванию пор и повышению температуры. Эти изменения существенным образом зависят от взаимной ориентировки блоков. Когда блоки имеют одинаковую кристаллографическую ориентацию, при их схватывании образуются части кристалла без разориентировки, но полного залечивания пор не происходит. Остаточная пористость при этом 82

уменьшается с давлением. В случае, когда блоки разориентированы, при их соединении образуется межзеренная граница, при этом даже при минимальном использованном давлении происходит полное залечивание пор.



Рисунок 3 – Схема атомной системы, использованной при моделировании УЗС меди: a) система без кристаллографической разориентации; б) система с разориентацией

При моделируемой УЗС в системе устанавливается стационарное распределение температуры с максимумом в области соединения, при этом в системе с разориентацией этот максимум значительно выше, чем в системе без разориентации.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-19-00617.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matheny M.P., Graff K.F. Ultrasonic Welding of Metals. In: *Power Ultrasonics-Applications of High-Intensity Ultrasound*, Gallego-Juárez J.A., Graff K.F., Eds. Woodhead: Cambridge, UK, 2015, pp. 259–293.

2. Hehr A, Norfolk M. A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal.* 2019. V.26. P. 445–458.

3. Yang J., Cao B., Lu Q. The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints. *Materials*. 2017, 10, 193.

4. Nazarov A.A., Bachurin D.V., Ni Z. Atomistic simulation of ultrasonic welding of copper. *Metals.* 2022, 12, 2033.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЗ-КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ В ЧУГУНАХ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКЕ

Волочко А.Т.¹, Ковалько М.С.¹, Рубаник В.В.², А. Nofal³ ¹Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь ²Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь ³СМRDI Cairo, Egypt kovalko.m@mail.ru

УЗ-колебания являются эффективным средством воздействия на процессы кристаллизации в металлах и сплавах, позволяя интенсифицировать процессы их получения и обработки. УЗ-обработка расплава высокопрочного чугуна, в котором формируется гетерогенная структура, приводит к измельчению как графитовой фазы, так и его металлической основы [1].

Среди разнообразных видов термоупрочнения высокопрочных чугунов наибольший интерес вызывает изотермическая закалка [2]. В результате такого вида термической обработки в чугуне формируется специфическая структура, называемая аусферритом (смесь игольчатого феррита и остаточного аустенита). Дисперсность структурных составляющих аусферрита в первую очередь регламентируется размером исходной (литой) структуры чугуна, так как зарождение и рост игольчатого феррита происходит в объеме границ получаемого при нагреве аустенитного зерна. В данном случае интенсификация процессов диспергирования литой структуры возможна за счет использования УЗ-волн на стадии затвердевания чугуна из расплава [3].

Использование УЗ-колебаний возможно не только на стадии его затвердевания, но и при дальнейшей термической обработке. В этом случае применяется физическое воздействие не на сам чугун, а на используемые охлаждающие среды [4]. Применительно к процессу изотермической закалки, УЗ-обработка жидких расплавов солей позволяет эффективно воздействовать на стадию пленочного кипения, когда на поверхности чугуна образуется «паровая рубашка» и скорость охлаждения невелика. Зa распространения жидкости сравнительно счет в УЗ-волн и эффектов ультразвуковой кавитации и звукового ветра, сопутствующих им интенсивность охлаждения на ранних стадиях процесса значительно увеличивается за счет более быстрого разрушения «паровой рубашки» [5].

Таким образом, целью данной работы является установление влияния УЗобработки на процессы диспергирования литой структуры чугунов в зависимости от их структурного класса, а также исследование особенностей формирования аусферритной матрицы в чугуне при изотермической закалке, в т. ч. при дополнительной УЗ-обработке используемых жидких закалочных сред.

При получении экспериментальных образцов из высокопрочного чугуна УЗколебания генерировались с помощью генератора УЗГ 20-15 с частотой 22,4 кГц и мощностью 0,7 кВт. Подвод колебаний осуществлялся через металлический волновод путем его ввода в форму с модифицированным расплавом. При термической обработке подвод УЗ-волн также осуществлялся непосредственно в рабочее пространство шахтной электропечи с приготовленным расплавом из смеси солей 50% NaNO₂ и 50% KNO₃. Сам процесс изотермической закалки проводился по режиму: нагрев 915 °C + выдержка 40 минут, далее охлаждение в расплаве солей при 375°C и 275 °C в течении от 1 до 20 минут.

Установлено, что для получения шаровидного графита правильной формы (ШГф4-5 по ГОСТ3443-87) со средним размером 15-20 мкм за счет

сфероидизирующего модифицирования расход магнийсодержащего модификатора составляет не менее 2,0÷2,5 % от массы расплава чугуна. В то же время показано, что дополнительное УЗ-воздействие в процессе кристаллизации чугунов различных структурных состояний позволяет получать шаровидный графит среднего размера 10-20 мкм при добавлении 1 % комплексного магнийсодержащего модификатора. Таким образом, использование УЗ-обработка расплава чугуна позволяет снижать расход использующихся модификаторов в 2÷2,5 раза.

Использование УЗ-обработки при кристаллизации расплава чугуна позволяет увеличить количество дисперсных графитных включений (средний размер до 10 мкм) с 30 до 55-80 % от всей удельной площади графитной фазы (рисунок 1). Установлено, что для эвтектических и заэвтектических чугунов наблюдается более выраженная степень измельчения шаровидного графита. Изменения в морфологии графитных включений в чугуне сказывается и на их свойствах. Наименьший прирост твердости (около 5 %) наблюдается в чугунах с доэвтектической структурой, а в чугунах эвтектического и заэвтеткического класса прирост твердости составляет 12 и 15 %, а прочности на 15 и 20 % соответственно.





EBSD-анализ образцов чугуна, закалённых при высоких и низких температурах при двух различных условиях затвердевания, показан на рисунке 2. В условиях статического затвердевания средняя толщина игольчатого феррита составляет 700 нм при закалке до 375 °C, и 500 нм в образцах, подвергнутых изотермической закалке при 275 °C. В чугунах, обработанных ультразвуком, можно было наблюдать значительно утонченную аусферритную структуру. Средняя толщина иголок феррита составляет около 400 нм и 100 нм в образцах, выдержанных при 375 °C и 275 °C соответственно. По результатам фазового анализа следует отметить, что объемная доля феррита во всех чугунах, обработанных ультразвуком, значительно выше, чем у статически затвердевших. Это происходит из-за большого количества графитовых включений, которые значительно увеличивают скорость превращения аусферрита.



Рисунок 2 – Морфология аусферритной матрицы в чугунах, полученных при статической (слева) и динамической (справа) кристаллизации с различной температурой выдержки: а) 375 °C; б) 275 °C

Дополнительная УЗ-обработка расплавов смеси солей при закалке нелегированных чугунов позволяет значительно интенсифицировать процесс охлаждения, что подтверждается и изменением структуры и свойств чугунов. После изотермической выдержки при 350°С в течении 1 минуты в расплаве солей без ультразвука в матрице чугуна формируется ферритно-карбидная смесь твердостью 220 НВ. При выдержке чугуна в расплаве солей с дополнительной УЗ-обработкой в течении такого же времени происходит формирование аусферритной матрицы твердостью 265 HB. После выдержки в течении 20 минут твердость чугуна после закалки в расплаве солей с ультразвуком составила 280-285 НВ, а при традиционной 250÷265 НВ. Соответственно, дополнительная обработка жидких закалке охлаждающих сред при закалке позволяет сокращать время изотермической выдержки до 2-ух раз, а также получать более высокие показатели прочностных свойств в чугуне.

Таким образом, использование УЗ-обработки является эффективным средством интенсификации процессов зарождения роста и структурных составляющих в чугуне как при его затвердевании, так и при дальнейшей термической обработке, в частности изотермической закалке. Показано, что кристаллизация модифицированного расплава чугуна в среде ультразвука частотой 22,4 кГц позволяет увеличить долю наиболее дисперсных включений графита (10-20 мкм) с 30 до 60-80 %. Это приводит к повышению прочности чугуна 15-20% и твердости на 12-15 %. Измельчение литой структуры в свою очередь приводит к диспергированию толщины игольчатого феррита в аусферрите в 2-5 раз в зависимости от температуры выдержки при закалке.

При изотермической закалке чугунов возбуждение УЗ-колебаний в охлаждающей жидкой среде (расплаве солей) разрушает «паровую рубашку», образующуюся вокруг охлаждаемого чугуна на стадии пленочного кипения, а также стабилизирует охлаждение на стадии пузырчатого кипения. При этом значительно повышается скорость охлаждения при наиболее высоких температурах поверхности чугуна (900-650°С) и увеличивается равномерность охлаждения. Это приводит к повышению прокаливаемости чугуна и повышения его свойств после закалки. Интенсификация процесса охлаждения также позволяет сокращать время изотермической выдержки до 2-ух раз.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов В.О. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В. и др. // М.: Янус-К, 2006. – 688 с.

2. Olejarczyk-Wożeńska, I., Parametric Representation of TTT Diagrams of ADI Cast Iron. Archives of Metallurgy and Materials, No 2 June (2012).

3. Ahmed, M., Riedel, E., Kovalko, M. et al. Ultrafine Ductile and Austempered Ductile Irons by Solidification in Ultrasonic Field. Inter Metalcast (2021).

4. Ковалько М.С., Волочко А.Г., Зизико А.В., Рубаник В.В. Формирование структуры и свойств в высокопрочном чугуне при его изотермической закалке с использованием ультразвука. Литье и металлургия. 2020;(4):118-124

5. Биронт В.С. Теория термической обработки металлов // Комбинированные методы: Учеб. пособие / СФУ: ИЦМиЗ. – Красноярск, 2007. – 152 с.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ

Жарко Н.А.¹, Минчук В.С.¹, Николаев А.Л.², Дежкунов Н.В.¹

¹УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь, dnv@bsuir.by

² Химический факультет Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Россия

Ультразвуковые колебания широко используются для интенсификации физикохимических процессов в жидкостях [1, 2]. Общепризнано, что ключевым фактором при этом является кавитация. Активность кавитации не определяется однозначно интенсивностью ультразвука, зависит от свойств жидкости, ее газосодержания, температуры, наличия зародышей кавитации других факторов [1]. Многие из параметров, влияющих на активность кавитации, могут неконтролируемо изменяться во времени при воздействии ультразвуком на жидкости или на жидкообразные среды, например, за счет дегазации или в результате химических реакций [3, 4]. В связи с новыми возможностями применения ультразвука в медицине и биологии контроль активности кавитации в ходе ультразвуковой обработки становится все более актуальной задачей.

В данной работе представлены предварительные результаты сравнения физических и химических методов оценки активности кавитации. В качестве представителя химических методов выбран сонолиз раствора йодистого калия [5]. Кавитационная активность в этом методе оценивается по концентрации С иона I₃⁻, образовавшегося в единицу времени. В данной работе для определения концентрации I₃⁻ использовался спектрофотометр Shimadzu UV-1280.

В качестве физических использовались: метод эрозионных тестов и спектрально – акустический метод, реализованный в кавитометрах серии ИКА (ICA – 3M, ICA – 3D, ICA – 7DS и др. [4, 6], БГУИР, Минск. Ультразвук генерировали погружным излучателем, диаметр излучающей поверхности – 15 мм, частота – 22,7 кГц. В качестве источника напряжения, подававшегося на излучатель, использовался генератор УЗГ 55 – 22 (БГУИР, г. Минск). Интенсивность ультразвука варьировали изменением напряжения на излучателе. Измерялась потребляемая генератором мощность W.

На рисунке 1 представлена динамика изменения концентрации $I_{\rm 3}^{-}$ для различных W.



W, Bт = 23,4 (1); 46,6 (2); и 71,3 (3). Штриховыми показана аппроксимация данных прямолинейными зависимостями.

Рисунок 1 – динамика изменения концентрации иона Із. в ультразвуковом поле

Видно, что зависимости С от времени t воздействия ультразвуком с высокой точностью являются линейными.

Для исследования эрозионной активности использовались тест – образцы из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм. Интенсивность эрозии оценивалась по максимальной глубине разрушения при постоянном времени экспозиции образца в УЗ поле. На рисунке 2 представлены фотографии, иллюстрирующие положение излучателя относительно фольги (2а) и влияние интенсивности ультразвука на интенсивность эрозионного разрушения образцов (2б).





a) положение излучателя относительно фольги: 1 – излучатель, 2 - тест – образец; б) эволюция эрозионного разрушения по мере увеличения интенсивного ультразвука; W, Bt = 9,13 (1); 18,2 (2); 28,9 (3); 46,6 (4); расстояние S между излучателем и верхним краем фольги при проведении измерений – 3 мм. Время экспозиции образцов в кавитационной области - 45 секунд.

Рисунок 2 – Кавитационное разрушение тест образцов

Как показали измерения, интенсивность эрозии, как и интенсивность акустического сигнала быстро падает по мере удаления от излучателя. На расстоянии 10 мм от излучателя скорость эрозии почти на два порядка ниже скорости эрозии, чем на расстоянии в 1мм.



а) – активность кавитации: 1 – датчик с U – образным волноводом, под излучателем на расстоянии Змм от излучающей поверхности; 2 – датчик с прямым волноводом, над излучающим диском на расстоянии Змм; б) – глубина эрозионного разрушения.

Рисунок 3 – Зависимости кавитационных эффектов от мощности W

Т.е. активная кавитационная зона сосредоточена в основном в небольшом объёме жидкости вблизи излучателя. Это обусловлено двумя факторами: интенсивным поглощением и рассеянием звука в кавитационной области и расходимостью звукового пучка. Отметим, что с ростом интенсивности ультразвука растет концентрация пузырьков в кавитационной области, что приводит к увеличению поглощения.

На рисунке 3 представлены зависимости активности кавитации А_к и глубины эрозионного разрушения G от W. Характер зависимости химической активности кавитации от W (рис. 1) существенно отличается от характера зависимостей двух других эффектов от W (рис. 3). Скорость химической реакции увеличивается с ростом

W в исследовавшем диапазоне значений W; эрозионная активность увеличивается в диапазоне до 20...30 Вт и затем остается практически постоянной величиной (рис 3б). Интенсивность кавитационного шума A_к (рис. 1а) при положении датчика под излучателем растет до 20...30 Вт и затем уменьшается, над излучающим диском – медленно увеличивается.

Одной из причин различий в представленных зависимостях могут быть различия в локализации эффектов. Как известно, при интенсивностях ультразвука выше порога кавитации в объёме жидкости генерируются акустические течения. Течениями обеспечивается интенсивный массообмен в рабочем объеме жидкости и непрерывная смена раствора в активной зоне. В результате при достаточном большом времени экспозиции раствора в УЗ поле происходит обработка всего объёма рабочей жидкости в то время как эрозионная активность сосредоточена в основном в активной зоне вблизи излучателя. Кавитационный шум также измерялся вблизи излучателя. Для выяснения природы обнаруженных расхождений планируется проведение дополнительных исследований с уточнением методики проведения экспериментов.

Представленное в данной работе исследование поддержано Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект № Т21М-027.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. – 271С.

2. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. – Бийск: Издательство Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 2010. – 250 С.

3. Brezhneva N., Dezhkunov N.V., Ulasevich S. A., Skorb E. V. Characterization of transient cavitation activity during sonochemical modification of magnesium particles. Ultrasonics Sonochemistry. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 70, № 3&4. – P. 105315-105327.

4. Котухов А.В., Минчук В.С., Жарко Н.А., Сербин В.В., Дежкунов Н.В. Кавитация в водных растворах углекислого газа. // Проблемы физики, математики и техники, 2019. Т. 41, № 4. С. 17-22.

5. Shinobu K., Takahide K., Takashi K., Hideto M. A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system. // Ultrasonics Sonochemistry. – 2003. – V. 10. – P. 149–156.

6. Кавитометр. https://cavitation.bsuir.by/en/cavitometer (Дата обращения 16.02.2023)

ЭРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ И КАВИТАЦИОННЫЙ ШУМ В НЕОДНОРОДНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Минчук В.С., Перхунова А.Ю., Шебеко В.П., Дежкунов Н.В.

УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь, slava.minchuk@bk.ru, dnv@bsuir.by

К настоящему времени предложено множество методов оценки активности акустической кавитации. Среди них метод эрозионных тестов остается наиболее распространенным, несмотря на ряд присущих ему недостатков [1, 2]. Основным недостатком этого метода является сложность аппаратурной реализации и как результат - невозможность использования в системах непрерывного контроля режимов ультразвуковых технологических процессов. С другой стороны, кавитационное разрушение (эрозия) является результатом прямого воздействия кавитации на твердую поверхность и поэтому может использоваться для оценки эффективности других способов обнаружения и исследования кавитации.

В данной работе выполнено исследование корреляции интенсивности кавитационной эрозии (КЭ) и интенсивности сигнала, генерируемого кавитационной областью – кавитационного шума (КШ).

Для генерирования кавитации использовалась ультразвуковая ванна (150*140*95 мм, частота f_0 =35 кГц). В качестве тест-образцов использовались полоски алюминиевой фольги размером 80*20 мм и толщиной 10 мкм. Фольга крепилась на держателе и помещалась рабочую емкость ванны вертикально. Для анализа КШ использовался кавитометр IC-3 (БГУИР, Минск) [3] с волноводным пьезокерамическим датчиком. Волновод имеет размеры: диаметр 4 мм, длина 140 мм, Боковая поверхность волновода экранирована звукоизоляционным материалом. Показания кавитометра представляют собой интеграл КШ в определенном частотном диапазоне (всего 5 диапазонов). В работе регистрировался полный выходной сигнал датчика H (10÷10000 кГц).

Звуковое поле в ванне неравномерно, из-за наличия компоненты стоячей волны оно представляет собой квазипериодические максимумы и минимумы, чередующиеся в вертикальной плоскости. В горизонтальной плоскости интенсивность звука уменьшается равномерно при удалении от центра ванны. В соответствии с принятой методикой выбрано несколько областей в УЗ ванне с различным уровнем активности кавитации. В каждой из этих областей поочередно экспонировались тест-образцы и выполнялось сканирование датчиком кавитации. Предварительно для этих областей сняты зависимости убыли массы образцов от времени и для каждой области выбрано время экспозиции $T_{\rm p}$, при котором убыль массы составляет 2*10⁻³ г. На каждую область в ванне приходилось по 12-15 образцов.

Для оценки эрозионной активности будем использовать величину Q, обратно пропорциональная натуральному логарифму времени разрушения *T*_p:

$$Q = \frac{1}{\ln(T_{\rm p})}$$

На рис. 1а показан результат сканирования датчиком (тепловая карта) для одной из исследовавшихся областей. Более темные области соответствуют более интенсивной кавитации. На рис. 16 и рис. 1в представлены результаты экспонирования в этой же области тест-образцов.

Разрушение образцов в горизонтальном направлении происходило в диапазоне координат [-15, 24]. На тепловой карте область с теми же горизонтальными координатами имеет более темный цвет, что соответствует большим показаниям кавитометра. Видно, что образец подвергся более интенсивному разрушению в правой части. То же самое наблюдается и на тепловой карте. Однако в вертикальном направлении имеются расхождения, а именно: максимум эрозии (рис. 16 и 1в) находится примерно на 5-7 мм ниже максимума показаний кавитометра.



Рисунок 1 – результаты сканирования области УЗ ванны: а – распределение интенсивности КШ; б, в – эрозионный тест

Величина этого расхождения варьируется в зависимости от места в ванне, где проводились исследования. Данное расхождение может быть связано с различиями в условиях проведения экспериментов. Алюминиевая фольга позволяет фиксировать воздействие кавитации с высокой локализацией, так как разрушающее воздействие на нее будут оказывать только пузыри, захлопывающиеся вблизи поверхности. Размер волновода датчика на несколько порядков больше (4 мм диаметр приемного элемента датчика, толщина фольги 10 мкм). На торец волновода оказывает воздействие захлопывание не только ближайших пузырей, но и находящихся на значительном удалении. Таким образом датчик измеряет не активность кавитации в конкретной точке пространства, а скорее обобщенную оценку кавитации в области вблизи волновода.

Для того, чтобы количественно посчитать корреляцию между показаниями кавитометра и эрозией, необходимо получить численную оценку активности кавитации в исследуемой области. Для этого на тепловой карте выделяется область, соответствующая местам разрушения фольги на тест-образцах. Показания датчика в местах разрушения усредняются, полученная величина обозначается H_p . По вертикальной оси есть смещение в показаниях, но авторы считают, что необходимо выбирать наиболее затемненные участки. Так, например, для представленной тепловой карты был выбран участок с координатами по горизонтали [-16, 24] и по вертикали [12, 16]. Величина H_p для показанной области составляет 93.6 условных единиц.

Для апробации алгоритма было выбрано 3 области ванны, в которых проводилось разрушение образцов. Для каждой из областей были вычислены Q и H_p . На рис. 2 приведены значения Q и H_p для выбранных областей. Для активности кавитации, определяемой по КШ (синие столбцы) используется шкала слева, для скорости эрозии (красные столбцы) – шкала справа. Видно, что анализируемые эффекты довольно сильно связаны – коэффициент корреляции Пирсона R^2 =0,98.



Рисунок 2 – Величина активности кавитации для исследуемых методов контроля активности кавитации

Таким образом, полученные результаты указывают на возможность адекватной оценки эрозионной активности кавитации на основании измерений интенсивности кавитационного шума. Данная методика будет использована для дальнейших исследований по выявлению взаимосвязи между результатами двух описанных методов контроля кавитации.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект № Т21М-027.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поддубный Б.Н. Усовершенствование методов эрозионных тестов по эрозии алюминиевой фольги и по убыли веса образца // Акустический журнал. – 1976. – Т. 22. – С. 586–589.

2. Эрозионный тест для ультразвуковых ванн [электронный ресурс]. – https://bandelin.com/en/applications/foil-test/. – Дата доступа: 15.02.2023

3. Кавитометр [электронный ресурс]. – <u>https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr</u>. – Дата доступа: 15.02.2023

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА АМПЛИТУДНО-НЕЗАВИСИМОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Варюхин В.Н., Малашенко В.В.

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк E-mail: malashenko@donfti.ru

Амплитудно-независимое внутреннее трение наблюдается при пропускании через кристалл высокочастотного ультразвука и является весьма эффективным методом как исследования различных материалов, так и воздействия на их физические свойства. Интенсивность внутреннего трения определяется, в первую очередь, вязкими потерями энергии, которые возникают при возбуждении колебаний дислокационных сегментов между точками закрепления дислокаций. Зависимость амплитудно-независимого внутреннего трения от частоты определяется выражением [1]

$$Q^{-1} = \alpha \frac{\omega/\omega_0}{1 + (\omega/\omega_0)^2}; \quad \omega_0 = \frac{\pi^2 G b^2}{BL^2}.$$

Здесь а - коэффициент, зависящий от плотности дислокаций и упругих модулей кристалла, *L* - эффективная длина сегмента, *G* - модуль сдвига, *B* - константа торможения дислокации, *b* - модуль вектора Бюргерса. Константа *B* оказывает значительное влияние как на величину внутреннего трения, так и на положение его максимума. Обычно главный вклад в формирование этой константы вносят различные механизмы фононного трения. Однако, как было показано в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия дефектов (ДВД), в магнетиках, обладающих гигантской магнитострикцией и содержащих высокую концентрацию примесных добавок, сильное магнитоупругое взаимодействие приводит к тому, что константа торможения становится функцией магнитных характеристик материала. Такие материалы в настоящее время привлекают всё большее внимание исследователей [3]. Гигантскую магнитострикцию в области низких температур демонстрируют Тb, Dy, Ho, Er и ферриты-гранаты этих металлов (например, Tb₃Fe₅O₁₂). Их магнитострикция на два-три порядка выше, чем магнитострикция в сплавах и ферритах группы Fe. При комнатных температурах такие значения магнитострикции можно получить, используя ферримагнитные соединения DyFe₂, TbFe₂, HoFe₂, DyFe₃. В рассмотренном нами случае вклад примесных добавок в константу дислокационного торможения определяется выражением

$$B_d = D \frac{n\chi^2}{\lambda^2 M_0^3}$$

Здесь M_0 – намагниченность насыщения, λ – константа магнитоупругого взаимодействия, n – концентрация точечных дефектов, χ – параметр несоответствия дефекта, D – коэффициент, зависящий от плотности дислокаций и упругих модулей кристалла. Приведенное выражение позволяет получить аналитическую зависимость внутреннего трения от магнитных характеристик материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И. Альшиц, В.Л. Инденбом. Успехи физических наук, 115, 3 (1975).

2. В.Н. Варюхин, В.В. Малашенко, Известия РАН. Серия физическая, 82 (9). 37 (2018).

3. Y. He, Y. Han, P. Stamenov, B. Kundys, J.M.D. Coey, C. Jiang, X. Huibin, Nature. 2018, 556, E5 (2018).

ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В КОМПРЕССИОННО СЖАТОМ ГРАНИТЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П., Чмель А.Е. Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Образование микротрещин при ударе регистрировалось методом акустической (АЭ). Показано, что распределение энергии во временных сериях эмиссии возбужденных импульсов АЭ следовало степенному закону, который идентичен закону Гутенберга-Рихтера как в свободных, так и статически нагруженных образцах. Наблюдалась тенденция, в которой первые удары производили локальные повреждения с всплеском АЭ от относительно мелких трещин, слияние которых при ударах последующих вызывало перераспределение вновь возникших микроповреждений в пользу более крупных образований. При генерации ударной волны в пред-предельно сжатом образце поверхность возникшей магистральной трещины превышала площадь локальных повреждений на несколько порядков величины, что характерно для триггерных эффектов, ведущих к масштабным разрушениям при внешнем воздействии с формально «безопасной» плотностью энергии.

Создание в последнее время все более крупных объектов инфраструктуры и появление новых технологий, в частности, распространение метода гидроразрыва пластов в нефтегазовой промышленности, привело к росту внимания к проблеме устойчивости систем, находящаяся в метастабильном состоянии, поскольку разрушение таких систем остается непредсказуемым и ведет к невосполнимым экономическим и человеческим потерям.

В последние годы было показано, что опасные всплески сейсмической активности могут провоцироваться ударными волнами техногенного (взрывы, ведение горных работ [1-5] и естественного происхождения: вулканическая деятельность [6], отдаленные землетрясения [7], усталостное разрушение горных пород [8], приливы [9], разрушение ледового покрова крупных водоемов [10], деформация земной поверхности, вызываемая сопряженными антициклонами или циклонами [11] и иными атмосферными явлениями [12]

Выход энергии при наведенном извне землетрясении может быть на много порядков величины выше, чем энергия источника его активации. Крупномасштабные процессы, вызываемые низкоэнергетичными событиями, относят к триггерным эффектам, при которых термодинамическая система (в частности, геосистема), находящаяся в метастабильном состоянии на грани энергетического баланса, теряет равновесие при незначительном внешнем воздействии.

При этом основными направлениями исследований в мире являются натурные наблюдения и построение математических моделей триггерного срыва, причем как правило, лишь для конкретных объектов. В научной литературе имеются сведения о лабораторных исследованиях феномена триггера [13, 14, 15], которые необходимы для выявления критерия опасности тех или иных природных явлений и антропогенных факторов на стабильность инженерных сооружений. В настоящем сообщении описано исследование триггерного перехода напряженной горной породы в неравновесное состояние в масштабе лабораторного эксперимента.

Модельная триггерная ситуация создавалась сочетанием статической компрессионной нагрузки и точечного ударного воздействия, направленного нормально к оси сжатия. Процесс накопления структурных дефектов (микротрещин) при двойном нагружении наблюдался методом акустической эмиссии (АЭ).

Ранее проведенные лабораторные исследования разрушения горных пород методом АЭ [16 – 18] показали, что зависимость числа импульсов или от их энергии (*E*)

следует степенному закону, идентичному закону Гуттенберга-Рихтера $\log_{10}N(M > m) \propto - bm$, где N число землетрясений с магнитудой M, превышающей величину m (величины M, пропорциональна логарифму E). Этот факт позволяет говорить об определенном подобии реальных и смоделированных в лаборатории процессов разрушения горных пород, поскольку в их основе лежит зарождение, накопление и кластеризация трещин.

Статистическая обработка временных серий эмиссионной активности заключалась в построении распределений выделенной энергии в импульсах, которые, как можно ожидать, отражают стабильность образца или приближение материала к критическому состоянию. Варьирование величин ударной нагрузки сжатого образца позволило оценить «опасные» комбинации нагрузок двух типов для горных пород.

В работе выполнены прямые исследования накопления дефектов в граните при ударной нагрузке, используя методику наблюдения образования и роста микротрещин в горных породах на основе анализа акустической эмиссии с наносекундным разрешением по времени.

Образцами служили блоки мелкозернистого гранита Вестерли размером 10×20×30 мм. Плотность материала 2650 г/см³; типичный размер зерен и пор 0.8 и 0.6 мм, соответственно [19].

Образец помещался под лабораторный гидравлический пресс, которым создавалось ступенчатое одноосное сжатие с относительным давлением $Q/Q_{th} = 0$; 0,3; 0,6; 0,9 и 0,97 (Q_{th} – предварительно определенный порог разрушения без ударной нагрузки). Локализованное повреждение поверхности образца осуществлялось заостренным закаленным бойком, который приводился в движение маятниковым копром (Рис. 1).



1- образец; 2 – пьезодатчик; 3 – боёк; 4 – копер; 5 – маятник

Рисунок 1 – Фотографии установки для ударного воздействия на образец с регистрацией возбужденного акустического сигнала

Система регистрации запускалась в момент касания копром бойка. Удар бойка производил лунку неправильной формы диаметром 0.2 – 1 мм и глубиной 0.2 – 0.5 мм в зависимости от величины Q/Q_{th}

Для регистрации АЭ на поверхность образца прикреплялся мастикой высокочувствительный широкополосный пьезодатчик из керамики Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃. Сигналы АЭ поступали на аналогово-цифровой преобразователь ACK-3106 и заносились в память компьютера в течение 1 мс с шагом 40 нс. Записанные сигналы АЭ подвергались цифровой низкочастотной фильтрации на уровне 100 кГц, чтобы отделить вклад колебаний элементов экспериментальной установки. После фильтрации развертки полезных сигналов АЭ регистрировались в области 100 – 500 кГц.

Полный цикл испытания включал 12 последовательных ударов (по 3 при нулевой и трех сжимающих нагрузках) плюс завершающие 1-2 удара при сжатии Q/Q_{th} ≅ 0.97, которые всегда приводили к макроскопическому разрушению образца.

Сравнение продолжительности сигналов выявило определенную закономерность. При воздействии на ненагруженный прессом образец все 3 первых импульса АЭ имеют примерно продолжительную длительность (~10 мкс). Первый произведенный при сжатии Q = 0.3Q/Q_{th}, (то есть 6-ой в общей удар. последовательности) имеет большую продолжительность излучения звука, чем 3 начальных удара в ненагруженный образец, но после следующих 2-го и 3-го ударов при Q = 0.3Q/Q_{th} длительность сигнала АЭ несколько сокращается. В серии Q = 0.6Q/Q_{th} время излучения звука вновь возрастает, причем наиболее длительный сигнал был после последнего (3-го) удара. В финальной серии Q = 0.9Q/Q_{th} время генерации АЭ при первом (10-м в общей последовательности) ударе достигает максимального в настоящем эксперименте, а затем вновь сокращается и по продолжительности, и по выделенной энергии.

Для оценки характера выделения энергии при точечном разрушении были построены графики распределения числа импульсов АЭ (*N*) в зависимости от их величины A^2 ($E \propto A^2$) в форме соотношения для энергии $N(E > \varepsilon)$ от ε , в котором энергия одиночного импульса ε принимает значения измеренных величин A^2 . На рис. 2 показаны полученные зависимости, построенные в двойном логарифмическом масштабе.



Рисунок 2 – Распределение энергии в импульсах АЭ, возбужденных ударом бойка по поверхности образца. Цифры у прямых отрезков отвечают последовательностям в сериях из 3-х ударов при сжимающих давлениях Q/Q_{th} = 0 (*a*); 0.3 (*б*); 0.6 (*e*); 0,9 (*e*).

Величины наклонов отрезков (параметр *b*) приведены в Таблице 1. Отрезки прямых на графиках отвечают соотношению:

$$\log_{10} N(E > \varepsilon) \propto -b \log_{10} \varepsilon, \tag{1}$$

где *b* – наклон прямых отрезков. Соотношение (1) эквивалентно степенни

$$N(E > \varepsilon) \propto \varepsilon^{-b}, \tag{1a}$$

характерному для событий, между которыми имеется дальнодействие. Наклон прямых отрезков характеризует относительный вклад «больших» и «малых» импульсов: в случае анализа АЭ, чем ниже наклон *b*, тем больше в процессе повреждения материала возникало более крупных микротрещин. При отсутствии сжимающего напряжения генерация АЭ после первых 3-х ударов картина развития повреждения была идентичной с точки зрения соотношения условно «мелких» и «крупных» микротрещин: наклон прямых отрезков *b* оставался постоянным в пределах погрешности опытов. В последующих сериях каждый следующий удар из трех вызывал распределение энергии с меньшим наклоном *b*, то есть в напряженном образце повторные удары вызывали относительное увеличение более крупных трещин, что особенно явно проявилось в последней серии ударов максимально напряженного образца (0.9Q/Q_{th}). Первый удар в этой серии вызвал превалирующее накопление мелких трещин, а два последующих (11-й и 12-й в общей последовательности) привели к относительному росту крупных микротрещин. Вариации наклона прямых показали сложный характер накопления трещин в зависимости от степени сжатия образца (табл. 1).

Таблица 1– Значения параметра *b* в уравнении (1) после серии ударного воздействия на образец.

Q/Q _{th}	0			0.3			0.6			0.9		
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
удара												
b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.68	0.60	0.63	1.38	1.19	1.01	1.99	1.59	1.35	4.60	1.50	1.44
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.07	0.02	0.10	0.03	0.03

Эволюция распределений энергии в развертках АЭ (рис. 2) отражает изменения в микромеханике локального разрушения гранита при последовательно прилагаемой постоянной ударной нагрузке. Волнообразное изменение наклона показывает, что после очередного увеличения сжимающей нагрузки первый удар вызывает возникновение преимущественно мелких дефектов, которые при последующих 2-ом и 3-м ударах объединяются, и энергия удара рассеивается в более крупных микротрещинах. Эффект наиболее хорошо выражен при максимальной неразрушающей нагрузке.

При повышении компрессии до величины ~0.97Q/Q_{th} происходило макроскопическое разрушение образца. Подчеркнем, что энергия бойка была всегда одинаковой, но масштаб разрушения в последнем случае оказался несопоставимым с повреждениями, возникшими при меньшей компрессии. Сравним площади при локально поврежденной поверхности и при масштабном разрушении образца.

На рис. 2 показана фотография повреждения, возникшего в результате ударного воздействия свободного образца. Площадь поверхностного разрушения составила ~ 0.3 мм², тогда как площадь поверхности образца, образовавшейся после прохождения магистральной трещины через весь образец (300 мм²), на три порядка величины превышает площадь первичного дефекта. Таким образом, для создания единицы площади разрушения при сжатии Q/Q_{th} = 0.97 потребовался лишь ~ 0.1% энергии удара, создавшего повреждение поверхности в свободном от давления образце.

В сериях ударов с одинаковой энергией происходит изменение размеров повреждений от преимущественно мелких к более крупным при последующих ударах. Эта тенденция становится более выраженной при увеличении компрессии гранита. Эффект объяснен слиянием трещин, возникших на первых этапах воздействия. Сравнение площадей разрушения до приложения сжимающей нагрузки и при компрессии, близкой к порогу разрушения (Q/Q_{th} = 0.97), показало, что при единообразном воздействии плотность энергии на единицу образованной поверхности оказалась на 3 порядка величины меньше, чем в свободном образце.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенкендорф О. В., Лебедев С. В., Боков В. Н. Мониторинг и прогноз триггерных эффектов, инициирующих землетрясения // V-я Международная конференция Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 4–7 июня 2019 г.) с. 27.

2. Батугин А. С. Горные работы как триггер тектонического процесса // То же, что [1], с. 22 – 23

3. Савельев, В. Н. модель и математический аппарат для оценки и слежения за развитием процессов проявления горного давления в подземных сооружениях / В. Н. Савельев, Х. Ф. Махмудов // Перспективные материалы и технологии: Сборник материалов международного симпозиума, Брест, 27–31 мая 2019 года / Под общей

редакцией В.В. Рубаника. – Брест: Витебский государственный технологический университет, 2019. – С. 189-192. – EDN TDWOIE.

4. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г., Куприш О. В. Наведённая сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. — 2020. Т. 2, № 3, с. 88 – 96.

5. Шерман С. И. Деструкция литосферы и ее реализация в разломообразовании и сейсмичности: разработка тектонофизической модели сейсмической зоны // Материалы Всероссийского совещания Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия (Иркутск 2009) с.77.

6. Prejean S. G., Hill D. P. Earthquakes, Dynamic Triggering of. In: Meyers R. (ed.) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer, New York. 2009.

7. Lahr J. C., Chouet B. A., Stephens C. D., Power J. A., Page R. A. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at Redoubt Volcano, Alaska // J. Volcanol. Geotherm. Res. — 1994. Vol. 309, p. 139 – 155.

8. Леонов М. Г., Кочарян Г. Г., Ревуженко А. Ф., Лавриков С. В. Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // Геодинамика и тектонофизика — 2020. — Т. 11. — № 3. — 491 – 521.

9. Scholz C. H., Tan Y. J., Albino F. The mechanism of tidal triggering of earthquakes at mid-ocean ridges // Nature Commun. — 2019. — Vol. 10. — Article No: 2526.

10. Пономарёва Е. И. Двухфазная модель предшоковой стадии подготовки землетрясений применительно к байкальской рифтовой зоне // V-я Международная конференция Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 4–7 июня 2019 г.) с. 164.

11. Латынина Л. А., Васильев И. М. Деформации земной коры под влиянием атмосферного давления // Физика Земли. — 2001. — № 5. — с. 45 – 54.

12. Султонов, У. Измерения малых потенциалов для количественного исследования поляризации при деформировании горных пород / У. Султонов, Х. Ф. Махмудов, Н. Г. Томилин // Ученые записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: Естественные и экономические науки. – 2020. – Т. 55. – № 4. – С. 23-29. – EDN OLBAJN.

13. Бобряков, А. П. Косых В. П., Ревуженко А. Ф. Триггерное инициирование разрядки упругой энергии в напряженной геосреде // ФТПРПИ — 2013. — №1. — с. 1–9.

14. Афанасьев, П. И. Распространение ударных волн и волн напряжений в горной породе / П. И. Афанасьев, Х. Ф. Махмудов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 27-34. – DOI 10.15372/FPVGN2021080104. – EDN FDUDCP.

15. Наносекундная динамика разрушения напряженного гранита под влиянием ударной волны (05) / И. П. Щербаков, В. И. Веттегрень, Р. И. Мамалимов, Х. Ф. Махмудов // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 8. – С. 1182-1184. – DOI 10.21883/JTE2017.08.44724.2075. – EDN ZCREQP.

16. Куксенко, В. С. Экспериментальное и теоретическое изучение актов трещинообразования в гетерогенных материалах / В. С. Куксенко, Х. Ф. Махмудов // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 915-923. – DOI 10.15372/GiG20170607. – EDN YTXZHL.

17. Прочность аппаратов воздушного охлаждения газа и определения продление ресурса / Х. Ф. Махмудов, У. Султонов, В. Н. Савельев, К. Е. Нигинаев // Ученые записки Худжандского государственного университета им. академика Б. Гафурова. Серия: Естественные и экономические науки. – 2021. – Т. 58. – № 3. – С. 22-28. – EDN XHUBZS.

18. Lei X., Satoh T. Indicators of critical point behavior prior to rock failure inferred from pre-failure damage, 2007, Tectonophys., Vol. 431, p. 97–111.

19. Chen Y. Observation of microcracks patterns in Westerly granite specimens stressed immediately before failure by uniaxial compressive loading, 2008, Chinese Rock. Mech. Eng. Vol. 27, p. 2440 – 2448.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОСТАВОВ Sb₂Te₃, Sb_{2-x}Cr_xTe₃, Sb_{2-x}Fe_xTe₃

Аплевич А.В.¹, Гурбанович Ан.В.¹, Гурбанович Ад.В.¹, Лапатко П.Ю.¹, Митюк В.И.¹, Рубаник В.В. мл.², Рубаник В.В.², Римский Г.С.¹, Янушкевич К.И.¹ ¹ГО НПЦ по материаловедению НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь k.yanushkevitch@yandex.by ²Институт технической акустик НАН Беларуси, г.Витебск, Беларусь

Соединение Sb₂Te₃ относится к веществам, носящим название топологические изоляторы [1-4]. Одной из особенностей топологического изолятора является то, что проводящая поверхность его не обладает свойствами с обычной металлической проводимостью. Движение носителей заряда на поверхности топологического изолятора происходит одновременно в двух взаимно противоположных направлениях: электроны со спином «вверх» движутся в одну сторону, а со спином «вниз» — в противоположную. Установлено, что все известные топологические изоляторы нестандартными обладают поверхностными электронными состояниями и электромагнитными свойствами. Это способствует их применению в технических устройствах. Поэтому актуально получение новых результатов экспериментов по изучению деформации кристаллической структуры топологических изоляторов и особенностей магнитного состояния таких веществ, поскольку они востребованы технологами приборостроения и теоретиками для моделирования.

Соединение Sb₂Te₃ синтезировано методом прямого сплавления элементов сурьмы и теллура высокой чистоты. Образцы составов Sb_{2-x}Cr_xTe₃, Sb_{2-x}Fe_xTe₃ получены методом твердофазных реакций при температуре 850⁰C. Все синтезированные составы подвергались ультразвуковому воздействию в спиртовой среде в кавитационном режиме при комнатной температуре. Аттестация образцов до ультразвуковой обработки (УЗО) и после проведена методом рентгеновской дифракции в Cu K_a - излучении. Результаты этого эксперимента приведены в таблице 1.

состав	a,Å	<i>c,</i> Å	c/a	V, Å ³
Sb ₂ Te ₃	4,25 ₅	30,33 ₄	7,12 ₉	475,54 ₁
Sb ₂ Te ₃ (звук)	4,26 ₁	30,45 ₆	7,14 ₇	478,85 ₇
Sb _{2-x} Cr _x Te ₃	4,25 ₉	30,11₅	7,07 ₁	473,02 ₅
Sb _{2-x} Cr _x Te ₃ (звук)	4,259 ₂	30,25 ₇	7,104	475,32 ₃
Sb _{2-x} Fe _x Te ₃	4,239 ₈	30,16 ₃	7,114	469,55 ₃
Sb _{2-x} Fe _x Te ₃ (звук)	4,251 ₀	30,40 ₅	7,15 ₁	475,82 ₉

Таблица 1 – Параметры элементарной ячейки Sb₂Te₃, соотношение осей и объём

Величины параметров элементарной ячейки ромбоэдрической сингонии, пространственной группы S.G.: R3m исследуемых составов находятся в корреляции с данными PCPDFWIN <u>v.2.00</u>, JCPDS 1998 (card 65-3678, 15-08774, 71-0393, 89-6185). Анализируя данные таблицы 1 можно сделать выводы, что воздействие ультразвуком и замещение ионов сурьмы на ионы Cr, Fe в элементарной ячейке Sb₂Te₃ оказывают минимальное влияние на параметр *а*. Несколько большее изменение параметра *с*, осевого соотношения *с/а*, и объёма. Изменение их величин достигает до 0,7-1,0%. Для кристаллической структуры такие изменения значительны. Так, например, изменения на 0,2% этих параметров в кристаллической структуре сульфида никеля приводит к фазовому переходу «металл-диэлектрик» [5].

Результаты изучения особенностей фундаментальных магнитных характеристик топологических изоляторов на примере составов Sb_2Te_3 , $Sb_{2-x}Fe_xTe_3$ и $Sb_{2-x}Cr_xTe_3$ К представлены на рисунке 1.







Рисунок 1 – Температурные зависимости удельной намагниченности и обратной величины удельной магнитной восприимчивости составов Sb₂Te₃, Sb_{2-x}Fe_xTe₃ и Sb_{2-x}Cr_xTe₃ до и после УЗО

Измерение величин удельной намагниченности и удельной магнитной восприимчивости выполнено пандеромоторным методом в интервале температур ≈ 80-600 (700) К [6]. Погрешность измерений удельной намагниченности Δσ ± 0,005 Am²кг⁻¹; удельной магнитной восприимчивости Δχ ±10⁻¹¹ м³кг⁻¹, соответственно.

Высокочувствительные к внешним воздействиям температурные зависимости величин удельной намагниченности и магнитной восприимчивости $\sigma = f(T)$ и $10^2 / \chi = f(T)$ (рисунок 1) показывают, что ультразвук заметным образом изменяет их величину. Особенно проявляется это на магнитной восприимчивости. Воздействие ультразвука приводит к изменению магнитного состояния. Исследуемые топологические изоляторы после воздействия ультразвуком претерпевают переход в состояние близкое к парамагнетизму Паули, характеризующееся практически неизменной величиной магнитной восприимчивости в широком интервале температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hasan, M. Z. & Kane, C. L. Colloquium: Topological insulators. Rev. Mod. Phys. 82, 3045–3067 (2010). doi: 10.1103/RevModPhys.82.3045.

2. Qi, X.-L. & Zhang, S.-C. Topological insulators and superconductors. Rev. Mod. Phys. 83, 1057–1110 (2011). doi: 10.1103/RevModPhys.83.1057.

3. Mal'shukov, A. G. & Chu, C. S. Spin Hall effect in a Josephson contact. Phys. Rev. B 78,104503 (2008). doi: 10.1103/PhysRevB.78.104503.

4. Bocquillon, E. et al. Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe. Nature Nanotechnology 12, 137–143 (2017). doi: 10.1038/nnano.2016.159.

5. Кузьмин, Е.В. Переход метелл-диэлектрик в соединениях переходных металлов, Сборник статей. Физика магнитных материалов. Новосибирск. Изд-во «НАУКА», Сибирское отделение - 1983. - С.32-60.

6. Янушкевич, К.И. Методика выполнения измерений намагниченности и магнитной восприимчивости. Система единства измерений Республики Беларусь. МВИ. МН 3128-2009 БелГИМ. - 2009. – 19 с.

НАПРАВЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПОЛИМЕРАХ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Аксенова Т.А., Классен Н.В., Цебрук И.С.

Институт физики твердого тела Российской академии наук имени Ю.А. Осипьяна, г. Черноголовка, Россия klassen@issp.ac.ru

При облучении пленок полистирола импульсами инфракрасного лазера с длиной волны 1,064 мкм и длительностью импульса 20 наносекунд обнаружено формирование новых типов неоднородностей круглой и ограненной форм (рис.1).



Рисунок 1 – Просвечивающая оптическая микроскопия неоднородностей, образованных в пленке полистирола облучением импульсами инфракрасного лазера (1,064 мкм, 20 наносекунд). Слева – системы концентрических колец, в центре и справа – ограненные неоднородности. Горизонтальные размеры кадров – порядка 300 микрон

Круглые неоднородности представляют собой системы концентрических колец с расстояниями между соседними кольцами от 6 до 10 микрон (рис. 1 слева). Ограненные неоднородности непрозрачны для видимого света и преимущественно имеют прямоугольные формы (рис. 1 справа). В ряде случаев наблюдаются вздутия круглого сечения со слабыми следами концентрических колец. Интенсивность инфракрасного излучения в импульсе составляла 10⁵ – 10⁶ вт/см², что достаточно для начала лавинного многофотонного поглощения света, приводящего к разного рода изменениям в морфологии пленки типа локального обугливания, вздутий или сквозных прожогов. Новизна изменений на рис. 1 заключается в их геометриях. Соотношение между количествами этих структурных нарушений зависит от предыстории конкретных образцов пленки. Они формировались отверждением раствора полистирола в бензоле, налитого на подложку в виде пищевой алюминиевой фольги или предметного стекла оптического микроскопа. Поверхность алюминиевой фольги имеет текстуру из параллельных полос, которая реплицируется пленкой, в то время как в пленках на стекле текстуры не было. В ряде случаев пленки полистирола легировались сцинтилляционными молекулами РРО и РОРОР, которые при рентгеновском или ультрафиолетовом возбуждении активируют люминесценцию полистирола в ультрафиолетовой и синей частях спектра. Если морфология этих пленок была текстурирована линейчатым образом, то включения имели огранку, одна из сторон которой была параллельна линиям текстуры. Во многих случаях ограненные включения имели форму прямоугольников (рис. 1, в центре и справа).

Мы объясняем формирование представленными выше лазерными импульсами в пленках полистирола неоднородностей с кольцевыми и ограненными геометриями нелинейными процессами многофотонного поглощения инфракрасного излучения с генерацией молекулярных экситонов. Для поглощения этого излучения молекулой полистирола необходимо одновременное участие как минимум четырех инфракрасных фотонов с длиной волны 1,064 мкм. Молекулярные экситоны являются бозечастицами, т.е. подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, когда вероятность образование нового экситона тем больше, чем больше аналогичных экситонов уже создано. Поэтому такое сугубо нелинейное поглощение происходит лавинным образом и его длительность может быть гораздо короче длительности возбуждающего лазерного импульса. Столь быстрое изменение электронных состояний молекул полистирола вызывает в молекулах генерацию высокочастотных акустических колебаний (фононов). Фононы также являются бозе-частицами и поэтому, и их генерация может происходить лавинным образом. При этом возбуждаемые фононы должны быть идентичны друг другу – в частности, совпадать по фазе колебаний, т.е. быть когерентными. Это означает, что нелинейное поглощение молекулами полистирола и его активаторами импульсов инфракрасного лазера способно возбудить в полистироле потоки когерентных фононов, т.е. направленные акустические волны соответствующих частот.

Дальнейшее движение этих акустических волн определяется геометрическим расположением молекул полистирола. В том случае, когда пленка полистирола формировалась на текстурированной подложке из алюминиевой фольги, в ней возникали участки из параллельных друг другу молекул. В такой ситуации акустическая волна распространяется по определенному направлению. Высокая плотность фононов в этой волне, в свою очередь, стимулирует новые всплески многофотонного поглошения еще продолжающегося лазерного импульса. Интенсивные колебания молекул, участвующих в этих процессах, могут привести к их разложению, когда входящие в них водород и кислород улетучиваются, оставляя на месте углерод. В итоге может сформироваться параллельная полоса из атомов длина которой будет ограничиваться углерода. произведением скорости распространения акустических волн вдоль молекул полистирола на длительность импульса. Сопоставление размеров непрозрачных включений лазерного С произведением скорости звука в полистироле на длительность лазерного импульса показывает, что между этими величинами есть удовлетворительное соответствие.

При использования такой схемы образования неоднородностей полистирола лазерными импульсами мы предполагаем, что системы концентрических колец образуются в тех местах, где основная масса молекул полистирола не ориентирована, а собрана в клубки, из которых составлены сферолиты – системы образованных из молекулярных клубков пластинок, исходящих по радиусам из единого центра. Многофотонное поглощение лазерного излучения с наибольшей вероятностью будет происходить в месте наивысшей концентрации молекулярного вещества, т.е. в центре сферолита. При лавинном поглощении возникнет ударная волна из атомарных смещений (что можно представить, как сгусток когерентных фононов). Но по мере удаления этой волны от центра сферолита фронт волны будет расширяться, а плотность вещества и скорость звука, соответственно, уменьшаться. Поэтому колебательные возбуждения, сгенерированные в центре сферолита позже, будут двигаться быстрее ушедших ранее. В результате возникнет кольцевое уплотнение.

Представленные здесь соображения о механизмах образования кольцевых и ограненных структур в пленках полистирола, облучаемых лазерными импульсами – пока лишь рабочая версия, которая будет нами проверяться исследованиями зависимостей наблюдаемых структур от молекулярного состава пленок, морфологии расположения в них полимерных молекул, длины волны, интенсивности и длительности лазерных импульсов.

Так или иначе, генерацию лазерными импульсами направленных потоков акустических волн, приводящих к образованию таких структур, мы считаем развивать установленным фактом. На этом основании можно некоторые востребованные практикой методики. Например, формирование в полимерных системах регулируемых сверхструктур с широким набором масштабов и химических составов для электронных и оптических устройств. С другой стороны, использование генерации направленных акустических волн представляет интерес для акустической микроскопии. Управляя геометрией поперечного сечения, возбуждающего такие волны лазерного пучка, можно в широких пределах регулировать формы акустических потоков, что способно обеспечить и фокусировку, и сканирование. Важное достоинство лазерного возбуждения участвующих в микроскопии акустических волн – возможность возбуждать их бесконтактным путем. Например, когда до объекта акустической микроскопии нет возможности добраться и его диагностику можно проводить только дистанционно. В таком случае возможно не только дистанционное управление зондирующими акустическими потоками, но и дистанционный анализ потоков, преобразованных обследуемым объектом. А это даст возможность проводить полную диагностику объекта на расстоянии от него.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ ЗА СЧЕТ ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

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

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

В настоящее время большое внимание уделяется очистке газов от частиц размером менее 2,5 мкм. Частицы такого размера легко удерживаются в воздухе и могут проникать внутрь организма человека, вызывая различные заболевания. Разработанное и применяемое оборудование оказывается недостаточно эффективным в удалении частиц размером менее 2,5 мкм. Перспективным способом повышения эффективности является ультразвуковая (УЗ) коагуляция – объединение частиц с целью их укрупнения за счет воздействия на газовый поток высокоинтенсивными акустическими колебаниями [1-2]. Для увеличения эффективности взаимодействия частиц необходимо реализовать их многократное перенаправление, чтобы осуществлялось их взаимное перемещение. Помимо этого, существенно повысить эффективность объединения частиц, особенно, при малой концентрации частиц позволяет их локализации с целью повышения концентрации частиц в определенных областях.

Наиболее эффективным способом осуществлять перенаправление и локализацию частиц является формирование потоков вихревого характера.

Вихревые потоки позволяют увеличить эффективность коагуляции за счет увеличения скорости взаимного перемещения частиц, увеличения времени взаимодействия частиц и формирования зон с повышенной концентрацией частиц [2].

Поэтому для создания зон с вихревыми акустическими потоками авторами было предложено формировать неоднородное ультразвуковой (УЗ) поле в газовом промежутке между излучателем и отражателем. Для увеличения уровня звукового давления необходимо формирование стоячей волны. В таком поле формируются вихревые течения между областями, колеблющимися в противофазе.

Для реализации предложенного способа повышения эффективности коагуляции с использованием вторичных эффектов (вихревых акустических потоков) было разработано устройство (рисунок 1, а).



1 – ультразвуковая колебательная система (УЗКС); 2 – пьезопреобразователь; 3 – концентратор; 4 – дисковый излучатель; 5 – отражатель; 6 – входной патрубок; 7 – загрязненный газ:

 8 – очищенный газ; 9 – объединенные частицы; 10 – выходные патрубки; 11 – распределение амплитуд колебаний; 12 – вихревые течения; 13 – перегородка; 14 – корпус; 15 – фланец; λ – расстояние между излучателем и отражателем

Рисунок 1 – Устройство для реализации ультразвуковой коагуляции (a), внешний вид ультразвукового излучателя (б) Для осуществления ультразвукового воздействия на газодисперсную среду был использован дисковый излучатель диаметром *D* = 200 мм. (рисунок 1, б). Возможность регулирования мощности электронного генератора позволяет оценить степень повышения эффективности коагуляции в зависимости от амплитуды колебаний дискового излучателя (от уровня звукового давления, формируемого УЗ излучателем). Расчетный расход газодисперного потока составил 2-3 м³/час.

Для определения возможности формирования равномерного распределения звукового поля со средним уровнем звукового давления не ниже *L* = 165 dB, а также для определения резонансного расстояния между излучателем и отражателем, при котором обеспечивается максимальный уровень звукового давления, проведено моделирование звукового поля методом конечных элементов (МКЭ). При моделировании задавалось фактическое распределение колебаний УЗ излучателя измеренное с помощью ранее разработанного стенда. Картина распределения уровня звукового давления приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Распределение уровня звукового давления внутри коагуляционной камеры

Для практического применения разработанного устройства для коагуляции высокодисперсных частиц в качестве газоочистного оборудования, конструкция была дополнена противоточным циклоном, установленным на выходе коагуляционной камеры. Таким образом, все формируемые агломераты частиц попадают на вход циклона и отделяются в нем за счет центробежных сил.

Для изучения возможностей эффективности улавливания частиц с помощью разработанного газоочистного оборудования были проведены экспериментальные исследования. Полученные зависимости представлены на рисунке 3.

Установлено, что при концентрациях менее 0,5·10⁻² г/м³ эффективность улавливания остается низкой (рис. 3, а) вследствие малого числа актов взаимодействия между частицами и низкой эффективностью коагуляции. При концентрации от 0,5·10⁻² до 2·10⁻² г/м³ происходит заметное повышение эффективности улавливания. При концентрации $N_{inlet} = 3·10^{-2}$ г/м³ и выше рост эффективности замедляется, так как достигаются предельные возможности коагуляции.

При уровне звукового давления более от менее 140 дБ эффективность, как коагуляции, так и улавливания остается на низком уровне (рис. 3, б). Максимальный рост эффективности улавливания наблюдается при УЗД от 145 до 150дБ. При значениях уровня звукового давления более 160 дБ рост эффективности сильно замедляется, что вызнано вторичным разрушением агломерартов.



Рисунок 3 – Зависимости эффективности улавливания от массовой концентрации частиц (а), уровня звукового давления (б), начального диаметра частиц (в)

Также на рисунке Зв приведена фракционная эффективность разработанного оборудования. Установлено, что эффективность улавливания частиц без УЗ воздействия для частиц размером 2,5 мкм составляет 45%, При этом УЗ воздействие приводит к увеличению эффективности до 93%.

Выводы

Проведенные исследования показали, что формирование высокоинтенсивного неоднородного ультразвукового поля позволяет существенно повысить эффективность ультразвуковой коагуляции при малой концентрации, что в свою очередь позволяет увеличить эффективность улавливания укрупненных частиц с помощью стандартного низкоэффективного газоочистного оборудования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00121), https://rscf.ru/en/project/19-19-00121/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Halonen, J. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly [Текст] / J. Halonen, T. Lanki, T. Yli-Tuomi, P. Tiittanen, V. Kulmala and J. Pekkanen. – Amrican Journal of Epidemilogy, 2009. – vol. 20, Iss. 1. – pp. 143–153.

2. Khmelev, V.N. The Limits of fine particles ultrasonic coagulation [Текст] / V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, A.S. Bochenkov and A.V. Shalunov. – Symmetry, 2021. – vol. 13, Iss. 9, 1607. – pp. 1–19. – DOI: 10.3390/sym13091607.

3. Khmelev, V.N. High-Frequency Ultrasonic Radiator Power Increase by Means of Summation of Vibrations of Symmetrically Arranged Langevin Transducers [Τεκcτ] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov and A.S. Bochenkov. – Symmetry, 2023. – vol. 15, Iss. 1, 208. – pp. 1–10. – DOI: 10.3390/sym15010208.
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИЛА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А., Тертишников П.П.

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

В современном мире существует тенденция быстрого развития различных направлений промышленности, в которых сушка является неотъемлемым этапом производства: пищевая, химическая промышленность, производства лекарственных трав и препаратов. К сушке выставляют определенные требования, например температура сушильного агента не должна превышать 60°С. Объясняется это тем, что при сниженных температурах обеспечивается большая сохранность изначальных свойств, например химического состава, вкуса, цвета, запаха [1-2].

Сегодня наиболее популярным способом удаления влаги является конвективный метод, который имеет ряд существенных недостатков: высокая энергозатратность, низкая скорость сушки, тепловое повреждение высушиваемого образца. Снижение времени сушки за счет увеличения температуры приводит к потере полезных свойств термолабильных и легкоокисляющихся веществ и материалов.

Одним из возможных способов повышения эффективности удаления влаги в условиях пониженных температур является использование энергии ультразвуковых колебаний в процессе конвективной сушки (бесконтактная ультразвуковая сушка) [3-4].

Однако УЗ сушка не нашла широкого применения в промышленности вследствие отсутствия источников высокоинтенсивного УЗ излучения и сушильного оборудования обеспечивающего оптимальные режимы и условия при которых ультразвуковые колебания максимально способствуют процессу сушки. Таким образом, существует необходимость исследования процесса сушки интенсифицируемой УЗ колебаниями с целью определения оптимальных условий и режимов, при которых достигается высокая эффективность.

Для проведения исследований был разработан специализированный стенд (рисунок 1). В состав экспериментального стенда входит технологический объем (поз. 1), который предназначен для размещения в нем высушиваемого материала (поз.7). Нагреватель (поз. 2) совместно с вентустановкой (поз.3) предназначены для нагрева сушильного агента и нагнетания его в технологический объем – сушильную камеру. Выходной патрубок (поз. 4) предназначен для отвода увлажненного сушильного агента. Отражатель (поз. 5) предназначен для переотражения падающей на него ультразвуковой волны. С целью установления стоячей волны (обеспечения резонансного расстояния между излучателем и отражателем) отражатель имеет возможность перемещения вдоль технологического объема с помощью ходового винта-направляющей (поз. 6). Для уменьшения степени поглощения ультразвуковых колебаний дополнительными конструктивными элементами, высушиваемый материал (поз. 7) равномерно размещен на подвесах. В качестве высушиваемого материала был использован поролон, так как он имеет стабильную структуру и размеры в различных условиях. В качестве источника УЗ колебаний использован ультразвуковой дисковый излучатель (поз. 8) диаметром 250 мм, частота 22 кГц (рисунок 1а).

На первом этапе экспериментальных исследований были проведены измерения уровня звукового давления и регулировка положения отражателя. После выполнения процедур и установления стоячей волны уровень звукового давления в пустой сушильной камере составил 161дБ.



Рисунок 1 – использованное оборудование: а – фото сушильной установки и ультразвукового дискового излучателя; б – схема сушильной установки

Далее проведена равномерная загрузка сушильной камеры высушиваемым материалом (кубиками поролона с размером 15 мм с влагосодержанием 900%). Масса сухого материала составляла 6 граммов. В процессе сушки проводился контроль уровня звукового давления. На рисунке 2 была приведена зависимость уровня звукового давления от влагосодержания поролона.



Рисунок 2 – Зависимость уровня звукового давления от влагосодержания поролона

Наличие сухого материала на подвесах приводит к понижению уровня звукового давления вследствие поглощения ультразвуковые колебания материалом и составляет 155 дБ. При наличии поролона с влагосодержанием в 900% уровень звукового давления составил 151дБ. Анализ зависимости показал, что присутствует экстремум при 700%-ом влагосодержании. В этот период сушки поролона, на поверхностях пористой структуры находится достаточное количество жидкой фазы обеспечивающей максимальное поглощение УЗ колебаний. На рисунке За представлены зависимости сушки поролона при 60°С при разных скоростях сушильного агента в камере (0,1 м/с и 0,2 м/с) как при наличии, так при отсутствии УЗ воздействия. На рисунке Зб приведены кривые сушки при пониженной температуре 40°С с и без УЗ воздействием.



Рисунок 3 – Экспериментальные кривые сушки поролона при различных условиях

Как видно из графиков (рисунок 3а) изменение скорости сушильного агента с 0,1 м/с до 0,2 м/с при конвективной сушке позволяет незначительно сократить время сушки со 100 минут до 90 минут (10%). Какого-либо существенного влияния на эффективность сушки изменение скорости сушильного агента не оказывает.

При наличии УЗ воздействии изменение скорости сушильного агента с 0,1 м/с до 0,2 м/с приводит к сокращению времени сушки с 80 минут до 70 минут.

За счет добавления УЗ воздействия при скорости 0,2 м/с, время сушки сокращается с 90 минут до 70 минут. При пониженной температуре (40°С) – зависимости на рисунке Зб, благодаря акустическому воздействию сокращается время сушки на 25% (со 160 минут до 120 минут).

Исследование выполнено при финансовой поддержки РНФ, в рамках проекта РНФ № 21-79-10359, https://rscf.ru/en/project/21-79-10359/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 2002. – 400 с.: ил.

2. Сажин Б.С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов / Б.С. Сажин М.К. Кошелева М.Б. Сажина – М.: МГУДТ. – 2013. – 301 с.

3. Shalunov A.V. Apparatus for Ultrasonic Drying of Disperse Materials / A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, V.A. Nesterov, R.N. Golykh, S.S. Zorin // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2017: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 302–307.

4. Khmelev V.N. Ultrasonic radiators for the action on gaseous media at high temperatures / V.N. Khmelev A.V. Shalunov V.A. Nesterov R.S. Dorovskikh R.N. Golykh // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – P. 224–228.

ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Шилько С.В., Сазанков А.П., Черноус Д.А.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель,

Беларусь, о mpri@mail.ru, alex saz.iob@gmai

shilko_mpri@mail.ru, alex.saz.job@gmail.com

Хорошо известна тенденция изготовления элементов конструкций из полимерных материалов и композитов, получаемых армированием полимерной основы высокопрочными волокнами стекла или углерода, что позволяет снизить вес, вибрации и шум, улучшить технологичность и эстетические показатели. К важным характеристикам механических свойств при динамических нагрузках следует отнести предел выносливости и число циклов до разрушения, определяемые посредством весьма длительных и трудоемких стандартизованных испытаний [1,2], объем которых растет пропорционально числу вариантов составов изучаемых композитов.

Для получения экспресс-оценки вышеназванных прочностных параметров востребованы методы, позволяющие достичь усталостного разрушения за «обозримое» время. Кроме того, представляет интерес определение предела выносливости и числа циклов до разрушения в условиях так называемой гигаусталости (свыше 10⁹ циклов до разрушения).

В данном сообщении обсуждаются возможности ускоренного расчетноэкспериментального определения усталостной прочности материалов с использованием ультразвука низкой частоты порядка 25 кГц, которая на 2, 3 и более порядков превышает частоту нагружения при проведении традиционных усталостных испытаний.

При математическом описании экспериментальных данных авторами было апробировано параметрическое уравнение Шерби-Дорна. В приведенной к базовой температуре *T*₀ форме это уравнение имеет вид

$$\lg N = A_1 + A_2 \lg \sigma_p + A_3 \lg^2 \sigma_p + A_T T_0 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right),$$

где A_1 , A_2 , A_3 , A_7 – подлежащие определению константы; T – температура образца по Кельвину. В тестовых расчетах температура приведения T_0 принималась равной комнатной температуре 20 °C = 293 *K*.

По полученным при температуре T_0 пяти точкам экспериментальной кривой Велера $\sigma_p - N$ определяются константы A_1 , A_2 , A_3 . Затем по одной точке $\sigma_k - N_k$, полученной при контрольной температуре, вычисляется параметр A_T

$$A_{T} = T \frac{\lg N_{k} - A_{1} - A_{2} \lg \sigma_{p-30} - A_{3} \lg^{2} \sigma_{k}}{T_{0} - T}.$$

После этого выполняется прогнозирование усталостной прочности материала в наиболее востребованной области чисел циклов нагружения (10⁵ – 10⁷) и напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 33845-2016 Композиты полимерные. Метод определения характеристик усталости в условиях циклического нагружения.

2. ГОСТ Р 57569-2017 Композиты полимерные. Метод испытания на усталость образцов с открытым отверстием.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Марукович Е.И., Николайчик Ю.А., Хоу Ябо

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, yuni@bntu.by

Различного рода покрытия (например, коррозионно-, термо- и износостойкое, светоотражающие, самоочищающиеся, несмачивающиеся и др.) находят широкое применение в промышленности, а их использование позволяет получить значительный экономический эффект. В связи с этим методы получения покрытий и сегодня являются предметом многих исследований и изобретений. В литейном производстве находят применение специальные защитные покрытия для литейных форм, которые при получения высокого качества поверхности литья, особенно точности и качества поверхности внутренних полостей отливки, которые формируются литейными стержнями. Поэтому, большинство литейщиков сходятся во едином мнении, что при прочих равных условиях для обеспечения высокого качества поверхности высокого качество литейщиков сходятся во едином мнении, что при прочих равных условиях для обеспечения высокого качества поверхности вытотовиях для обеспечения высокого качества поверхности вых рому, большинство литейщиков сходятся во едином мнении, что при прочих равных условиях для обеспечения высокого качества поверхности вытотовиях для обеспечения высокого качества поверхности отливок (практически при любом технологическом способе их изготовления) применение литейных покрытий – одно из самых эффективных средств.

Покрытия литейных форм в готовом к применению виде представляют собой многокомпонентные системы, включающие следующие суспензии. основные составляющие: высокоогнеупорный тонкодисперсный наполнитель, связующие, растворитель и различные вспомогательные добавки-модификаторы. Покрытия литейных форм обладают рядом физико-механических свойств, которые можно (структурно-реологические), разделить на технологические определяющие пригодность покрытия для нанесения на поверхность литейной формы или стержня и эксплуатационные (рабочие) - свойства покрытия, проявляющиеся при его контакте с расплавом и оказывающие непосредственное влияние протекание процессов в контактной зоне «расплав-литейная форма», состав, структуру и качество поверхности будущей отливки.

К первой группе свойств необходимо отнести такие базовые свойства защитных покрытий как плотность, вязкость, прочность на истирание, кроющая и проникающая способность, толщина слоя, а также седиментационная устойчивость. Эти свойства формируются в процессе приготовления покрытий и зависят как от природы и количества исходных компонентов, так и от технологии приготовления, когда во всем объеме суспензии протекают когезионно-адгезионные процессы, определяющие будущие свойства и эффективность покрытий в целом.

Технология приготовления защитных покрытий литейных форм как правило представляет собой процесс механического перемешивания, когда получение готового к применению (нанесению) покрытия осуществляется в несколько этапов путем приготовления основы (лака), представляющего собой эмульсию связующего и других жидких компонентов (ПАВ, стабилизаторов, антисептиков и др.) в растворителе (как правило, спирты или вода) и последующего добавления высокоогнеупорного наполнителя, который должен быть не только равномерно распределен во всем объеме готового покрытия, но и в сочетании с другими компонентами покрытия сформировать единую многокомпонентную систему, обладающую изотропными свойствами.

Известно [1], что ультразвук применяют для ускорения и интенсификации физико-химических процессов в жидкостях. В ультразвуковом поле возникает кавитация, акустические течения и другие эффекты, способствующие быстрому перемешиванию жидкостей и соприкасающихся с ними твёрдых частиц. Размываются

пограничные слои между разными жидкостями и между жидкостями и твёрдыми веществами, а процессы, идущие в этих слоях, существенно ускоряются.

установлены В настоящей работе были изучены закономерности И формирования свойств защитного покрытия на основе высокоогнеупорного $(AI_2O_3 \cdot SiO_2)$ алюмосиликатного наполнителя в сочетании добавками С наноструктурированного материала (АЮОН). В качестве связующего использована поливинилацетатная дисперсия (ПВАД), дисперсионная среда – водный раствор алифатического изопропилового спирта (АИПС).

В процессе исследований получены результаты (рис.1-4), показывающие изменение свойств покрытия таких как вязкость, плотность, проникающая способность, толщина слоя покрытия, прочность к истиранию, седиментационная устойчивость и газотворная способность (измерения указанных выше свойств защитных покрытий проводили по стандартным методикам) и определены методами математического планирования оптимальные диапазоны концентрации компонентов покрытия (ОКК).



Рисунок 1 – Физико-механические свойства противопригарного покрытия в зависимости от содержания огнеупорного наполнителя:

 толщина красочного слоя; 2 – проникающая способность; 3 – вязкость; 4 –



Рисунок 3 – Изменение прочности к истиранию и газотворной способности покрытия в зависимости от содержания связующего: 1 – прочность к истиранию; 2 – газотворная способность



Рисунок 2 – Изменение прочности к истиранию и газотворной способности покрытия в зависимости от содержания связующего: 1 – прочность к истиранию; 2 – газотворная способность



Рисунок 4 – Седиментационная устойчивость

В ходе исследований установлено, что предельно минимальная концентрация огнеупорного алюмосиликатного наполнителя составляет 40,9%, а максимальная – 49,2%; диапазон оптимальной концентрации поливинилацетатного связующего определен локальной областью от 3,5 до 4,3%; для обеспечения стабильности системы необходимая концентрация алифатического изопропилового спирта в водном растворе составляет 50%. Вместе с тем установлено, что увеличение концентрации наномодификатора приводит к более интенсивному росту вязкости, характер изменения которой преобразуется с квадратичного в кубический, что приводит к

резкому изменению других свойств, вплоть до превращения системы в пастообразную субстанцию.

Для решения этого вопроса, по нашему мнению, перспективным видится применение ультразвуковой обработки в процессе приготовления защитного покрытия, а именно высокочастотныхх ультразвуковых колебаний, которые используются для интенсификации химических процессов, изменения структуры и свойств веществ [1] за счет кавитанционных явлений, вызывающих мощные ударные колебания, которые приводят к увеличению дисперсности частиц. Влияние акустических воздействий на жидкие дисперсные среды описано в ряде источников [2; 3; 4], но на сегодняшний день изучено не в полной мере в практике применения защитных покрытий литейных форм, кроме того, ряд предположений существующих методик противоречат друг другу. Известно, что диспергирование ультразвуком происходит, как было отмечено, за счет кавитации ультразвуковых волн, которые формируют новые микротрещины в частицах [5]. Вызывает уверенность, что такой подход на одном из этапов приготовления защитного покрытия позволит найти более рациональные решения в процессе исследований, направленных на разработку новых составов защитных покрытий и повысить их эффективность при получении отливок с высоки качеством поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. — Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. — 203 с. — ISBN: 978-5-9257-0187-4.

2. Антонникова А. А., Коровина Н. В., Кудряшова О. Б., Ахмадеев И. Р., Шалунова К. В., Хмелев В. Н. Экспериментальное исследование динамики дисперсных характеристик аэрозоля при ультразвуковом воздействии // Ползуновский вестник. 2011. № 4-1. С. 176-179.

3. Кузовников Ю. М., Хмелев С. С., Цыганок С. Н., Хмелев В. Н. Исследование процессов коагуляции и осаждения мелких твердых частиц в жидкой среде при ультразвуковом воздействии [Электронный pecypc]. URL: http://u-sonic.ru/pubs/ issledovanie-protsessov-koagulyatsii-i-osazhdeniya-melkikh-tverdykh-chastits-v-zhidkoi-srede-pr (дата обращения: 14.01.2016).

4. Маргулис М. А. Основы звукохимии: химические реакции в акустических полях: учебное пособие для химических и химико-технологических специальных вузов. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.

5. Левковский Ю. Л., Чалов А. В. Влияние турбулентности потока на возникновение и развитие кавитации // Академический журнал. 1978. Т. 24. Вып. 2. С. 221-227.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ

Хмелев В.Н., Генне Д.В., Нестеров В.А., Барсуков Р.В., Шалунов А.В.

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

Ультразвуковое распыление жидкостей широко используется при решении задач напыления различных покрытий [1,2], в распылительной сушке [1,2]. Основным преимуществом УЗ метода практически монодисперсный состав формируемых частиц, размеры и количество которых определяются выбором рабочей частоты, мощностью и конструктивными особенностями распылительных устройств.

В настоящее время, современные высокотехнологичные производства и медицина, испытывают наибольшую потребность в высокочастотных распылителях, обеспечивающих формирование частиц со средним размером 15...25 мкм, распространяемых в виде факелов определенного размера и формы до объектов нанесения покрытий.

Основная проблема, связанная с формированием требуемых потоков, обусловлена отсутствием у формируемых частиц аэрозоля значительной скорости при отрыве от колеблющейся поверхности распылителя. Это приводит к нестабильности факела распыления в пространстве и его перемещению по случайной траектории по рабочей поверхности. Распространение частиц аэрозоля происходит на небольшие расстояния (несколько сантиметров). Указанные проблемы приводят к невозможности нанесения покрытий на незначительные по размерам изделия (например – коронарные стенты) при малой производительности дорогостоящих материалов.

Для стабилизации условия формирования факела аэрозоля в пространстве возникает необходимость создания в составе распылителей дополнительных воздушных потоков, которые способны удерживают поток аэрозоля вдоль своей оси и формировать различные по форме и размерам напыляемого пятна факелы распыляемого аэрозоля. На решение этих задач направлены представленные далее результаты исследований и разработок.

Для стабилизации факела при малой производительности распыления на высокой частоте (рабочая частота 160 кГц, размер частиц 18 мкм) предложена и реализована конструктивная схема, реализующая подачу газа по центру формируемого факела аэрозоля. На рисунке 1 представлена конструкция распылительной ультразвуковой колебательной системы с такой системой подачи.



1 – УЗКС, 2 – распыляющая поверхность, 3 – подающая игла, 4 – штуцер подачи газа, 5 –корпус,6 – система позиционирования подающей иглы

Рисунок 1 – Распылительная система с подачей газа по центру факела

Распыляемая жидкость через трубку(3) подается на рабочую поверхность (2) колебательной системы (1), посредством УЗ колебаний формируется аэрозоль частицы которого захватываются потоком газа, истекающего из центрального канала и уносятся формируя тем самым узкий факел аэрозоля.

Для решения задачи формирования различных по форме и размерам напыляемого пятна факелов распыляемого аэрозоля предложена и реализована конструктивная схема, реализующая подачу газа вдоль внешней поверхности формируемого факела аэрозоля.

На рисунке 2 представлена конструкция ультразвуковой колебательной системы (рабочая частота 80 кГц, размер частиц 25 мкм), реализующая формирование факела внешним потоком газа.

Распыляемая жидкость через штуцер (4) и канал (7) поступает на рабочую поверхность колебательной системы, где посредством УЗ колебаний формируется аэрозоль[3]. Частицы аэрозоля захватываются потоком газа, истекающего из аксиального канала (8) и формируют плотный цилиндрический поток аэрозоля, как показано на фото (рисунок 3а).



1- УЗКС, 2 – корпус, 3 – подача газа в аксиальный канал, 4 – штуцер подачи распыляемой жидкости, 6 – пластина формирующая воздушный поток, 7 – канал подачи распыляемой жидкости, 8 – аксиальный канал подачи газа



В случае если газ будет истекать из аксиального канала под углом (закрученный поток) то будет формироваться факел в виде конуса, как показано на рисунке 36.



Рисунок 3 – Форма факела аэрозоля

При решении задач нанесения равномерных покрытий на большие поверхности возникает необходимость формирования плоского факела.

Формирование такого факела возможно за счет подачи дополнительных воздушных струй с противоположных сторон узкого факела, сформированного аксиальным потоком, как показано на рисунке 4.



1— УЗКС, 2 – корпус, 3 – подача газа в аксиальный канал, 4 – штуцер подачи распыляемой жидкости, 6 – пластина формирующая воздушный поток, 7 – канал подачи распыляемой жидкости, 8 – аксиальный канал подачи газа, 9 – форсунка формирования плоского факела

Рисунок 4 – Распылительная система, формирующая плоский факел распыления

В конструкции распылительной системы представленной на рисунке 4 предусмотрены дополнительные воздушные форсунки, расположенные по бокам от формируемого факела. Создаваемый таким образом дополнительный воздушный поток позволяет формировать "веерообразный" факел.

На рисунке 5а показана форма формируемого плоского факела, а на рисунке 5б визуализация пятна формируемого плоским факелом.



Рисунок 5 – Сформированный плоский факел аэрозоля

Выводы.

Для практической реализации ультразвукового распыления аэрозоля предложены и разработаны конструктивные схемы и устройства, обеспечивающие формирование наиболее востребованных в настоящее время факелов:

- в виде узкого потока для нанесения покрытий на миниатюрные объекты;
- конической формы для внесения аэрозоля в распылительные сушилки, и нанесения покрытий на сравнительно небольшие площади;

• в виде плоского факела, позволяющего наносить равномерные покрытия на большие площади.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00121), https://rscf.ru/en/project/19-19-00121/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. тех. ун-та, 2015. – 688 с.

2. Новицкий, Б. Г. Применение акустических колебаний в химикотехнологических процессах (процессы и аппараты химической и нефтехимической техники) - М.: Химия, 1983. - 192 с.

3. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей / / физические основы ультразвуковой технологии/под ред. Л. Д. Розенберг. - М. : Наука, 1970. - р.337-395.

ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Марукович Е.И., Стеценко В.Ю.

Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь E-mail: stetsenko.52@bk.ru

Твердые сплавы в основном состоят из карбидов, которые связаны между собой зернами пластичной металлической связки. Известно, что ультразвуковое воздействие упрочняет твердые сплавы за счет повышения плотности дислокаций в зернах пластичной металлической связки [1]. Это происходит вследствие наклепа от воздействия ультразвука. Наклеп, как известно, повышает плотность дислокаций в сплавах [2]. При этом происходит искажение их кристаллических решеток, препятствующее перемещению дислокаций.

В последнее время появился метод аэродинамического звукового воздействия на свойства твердых сплавов, который называется «аэродинамическим звуковым упрочнением» (АДУ) [3–5]. Метод АДУ осуществляется следующим образом: образцы из твердого сплава нагревают, выдерживают при температуре 300 °C, а затем обрабатывают в специальной камере аэрозвуковой волной частотой 140...170 Гц [3, 4]. Разработчики метода АДУ считают, что этот метод повышает ресурс работы твердосплавного инструмента при прерывистом резании [3–5].

Исследование теоретических основ метода АДУ показывает, что они ошибочны [6]. В основе расчета математической модели метода АДУ лежит формула [4]:

$$\omega_{max} = 2 \sqrt{\frac{F_0}{a_1^2 m}},\tag{1}$$

где ω_{max} – «максимальная частота волны, распространяющейся по цепочке атомов, способная привести к смещению атома»; F_0 – сила, необходимая для смещения атома на межатомное расстояние a_1 ; m – масса атома. Эти величины имеют следующие размерности: $[\omega_{max}] = c^{-1}$; $[F_0] = H = \kappa_{\Gamma} \cdot M \cdot c^{-2}$; $[a_1] = M$; $[m] = \kappa_{\Gamma}$. Подставляя эти размерности в формулу (1), получим:

$$M^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}$$
(2)

Уравнение (2) абсурдно, поэтому формула (1) ошибочна. Это теоретически доказывает, что математическая модель метода АДУ ошибочна.

Разработчики метода АДУ считают, что он упрочняет твердые сплавы за счет измельчения и перераспределения карбидов (модифицирования структуры), уменьшения плотности дислокаций в зернах металлической связки [3–5]. При этом происходит увеличение ударной вязкости твердых сплавов. Разработчики метода АДУ считают, что после обработки этим методом твердых сплавов ВК8, T15K6, T5K10 их ударная вязкость повышается на 20–24% [3–4].

Чтобы произвести модифицирование структуры твердых сплавов при температуре 300 °С, нужно подвергнуть их значительной деформации (ковке) без образования трещин и разрушения образцов. Но это невозможно сделать из-за высокой хрупкости твердых сплавов, содержащих большое количество карбидов. Снижение плотности дислокаций в зернах металлической связки твердого сплава должно повышать его пластичные (вязкостные) свойства и снижать прочностные [2]. Поэтому метод АДУ не упрочняет, а разупрочняет твердые сплавы, повышая их ударную вязкость.

Разработчики метода АДУ считают, что этот метод является динамическим способом воздействия на твердые сплавы, поэтому должен повышать плотность

дислокаций в зернах металлической связки. Но этого не происходит, потому что аэродинамическое звуковое воздействие не оказывает влияния даже на пластичную металлическую связку твердого сплава. Ультразвуковые волны имеют частоту как минимум в 150 раз больше, чем аэрозвуковые волны в методе АДУ. Поэтому ультразвук обладает значительной мощностью, чтобы упрочнять твердые сплавы за счет наклепа.

Снижение плотности дислокаций в зернах металлической связки твердого сплава и увеличение его ударной вязкости при обработке методом АДУ происходит только в результате нагрева и выдержки твердого сплава при 300 °C. При этом происходит возврат, который снижает плотность дислокаций сплава. В результате прочность сплава снижается, а пластичность и ударная вязкость возрастают [2].

Разработчики метода АДУ считают, что повышение ресурса работы твердосплавного инструмента, обработанного методом АДУ, в условиях повышенных ударных нагрузок при прерывистом резании, происходит за счет снижения хрупкости твердых сплавов. Но это происходит не за счет аэродинамического звукового воздействия, а в результате термической обработки (возврата) твердого сплава.

Выводы

1. Теоретические основы метода АДУ ошибочны.

2. При применении метода АДУ к твердым сплавам не происходит их упрочнение.

3. Ударная вязкость твердых сплавов, обработанных методом АДУ, повышается не за счет аэродинамического воздействия, а только в результате термообработки (возврата) твердых сплавов, которая известна и широко применяется для снижения хрупкости твердых сплавов.

4. Аэродинамическое звуковое воздействие не оказывает влияния на свойства твердых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоцкий, А.В. Ультразвуковое упрочнение материалов / А.В. Белоцкий, В.Н. Виниченко, И.М. Муха. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.

2. Лахтин, Ю.М. Материаловедение. Учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

3. Жигалов, А.Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А.Н. Жигалов, В.К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 213 с.

4. Жигалов, А.Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / А.Н. Жигалов. – Минск, 2021. – 382 с.

5. Жигалов, А.Н. Исследование силовых параметров процесса резания твердосплавным горно-режущим инструментом из сплава ВК8, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А.Н. Жигалов, Д.Д. Богдан, Е.А. Веремейко // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 1. – С. 48 – 60.

6. Стеценко, В.Ю. О методе аэродинамического звукового упрочнения металлокерамических твердых сплавов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 137–138.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ БЕСКОНТАКТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ СТАЛЬНОГО МЕТАЛЛОКОРДА

Кожушко В.В., Сергиенко В.П.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь, vkozhushko@mpri.org.by

Перед производителями металлокорда стоит задача совершенствования системы контроля длины намотки в катушках, что обусловлено повышением требований со стороны потребителей по точности метража, исключающей как недостаток, так и излишки. Для металлокорда последовательным волочением из катанки диаметром 6 мм изготавливают стальную проволоку диаметром до 0,22 мм. Конечной продукцией является свивка более десятка стальных нитей. Контроль длины намотки является непростой технической задачей, поскольку на этапе проектирования данным вопросам не уделялось достаточное технологического оборудования внимание, а модернизация в текущих условиях довольно затратна. С другой стороны возможен поиск альтернативных подходов для решении данной задачи. Ввиду протяжённой геометрии отдельная проволока является волноводом для упругих колебаний, в частности ультразвука, который может распространяться на значительные расстояния без существенных потерь наблюдаемых в случае объёмных сред. Аналогично оптическим импульсам и волокнам, в случае упругих волн можно предположить возможность возбуждения и регистрации импульсного возмущения для определения скорости распространения и/или расстояния пробега. Таким образом, стоит задача практической реализации возбуждения и регистрации ультразвука для расстояний, на которых может быть применён данный оценки подход, рассматривающий только отдельную проволоку.

своей работе приведены результаты исследования B предыдущей бесконтактного возбуждения ультразвука импульсным лазером на образцах стальной проволоки различного диаметра С механически обработанными торцами, расположенными перпендикулярно осевой линии [1]. Длина отрезков проволоки составляла несколько десятков сантиметров. Регистрация возмущения выполнялась двумя катушками небольшого размера, размещёнными вдоль проволоки, на расстоянии менее 50 мм. Целью исследований было определение упругого модуля проволоки, через измерение скорости распространения ультразвука на фиксированном расстоянии между катушками, при этом отмечалась регистрация многократных отражений возбуждаемого импульса. Несмотря на все преимущества лазерного возбуждения ультразвука и обеспечиваемую им точность измерения, в случае ферромагнитных материалов предлагается использование электромагнитных акустических преобразователей с разнесёнными возбуждающим и регистрирующим преобразователями.

Цель работы показать возможности по измерению длины отдельной стальной проволоки в результате бесконтактного возбуждения и регистрации ультразвука.

Образцом для исследования выбрана стальная проволока диаметром 1,6 мм и длиной 256 мм. В основе возбуждения ультразвука лежит магнитострикционный механизм, воздействие импульсов магнитного поля приводит к быстрому локальному сжатию ферромагнитной проволоки и запуску упругого импульса. Для возбуждения магнитного импульса через катушку, включённую нагрузкой в схеме полного моста, пропускают импульсы тока субмикросекундной длительности с чередующимся направлением. Переменный ток создаёт импульсное электромагнитное поле в катушке, охватывающей свободный конец проволоки. В схеме преобразования использован генератор управляющих импульсов, выполненный на программируемой логической интегральной системе Cyclone IV (Altera, USA). Генератор формирует пакеты низковольтных 3,3 В управляющих импульсов, частота следования пакетов

составляет 29 Гц, что обеспечивает интервал между возбуждаемыми импульсами более 33 мс. Управляющие импульсы преобразовываются драйверами до уровней напряжений, открывающих попарно затворы транзисторов, верхнего и нижнего плеча моста, пропуская ток через катушку, в нашем случае направление тока меняется один раз. Катушка длиной 7 мм образована 10 витками медной проволоки диаметром 0,5 мм, намотанной в два слоя. Напряжение питания высоковольтной части схемы составляет 90 В, что с учётом заявленных сопротивлений транзисторов и незначительного сопротивления катушки позволяет возбуждать токи с амплитудой до 100 А.

Предварительные результаты показали, что в полосе частот до 1 МГц распространяется преимущественно продольная стержневая мода, дисперсия которой незначительна [1]. Экспериментально требуется оценить затухание, включающее поглощение, связанное с наличием дефектов, присутствующих в отдельных кристаллитах, и потери, вызванные рассеянием на границах раздела зёрен.

Регистрация ультразвука выполнялась с помощью преобразователя на основе операционного усилителя (40 дБ, 15 МГц). В качестве чувствительного элемента использовали катушку из 20 витков медного провода диаметром 0,15 мм и длиной 5 мм, намотанных в два слоя на трубку диаметром 3,5 мм. Для регистрации импульсов использовали цифровой запоминающий осциллограф DS1104Z (Rigol, KHP), при двух задействованных каналах частота дискретизации составляет 500 МГц. Для уменьшения шума операционного усилителя применяли усреднение по 128 реализациям. Результат измерений возбуждаемого сигнала показан на рис. 1. С начального момента времени до 20 мкс зарегистрирована наводка, вызванная возбуждающим электромагнитным импульсом. Через 49 мкс на другой конец проволоки прибегает первичный ультразвуковой импульс, затем, через интервал времени 97,6 мкс регистрируется его первое отражение и далее этот процесс продолжается до полного затухания в образце.



Рисунок 1 — Зарегистрированный электромагнитным акустическим преобразователем сигнал. В начальный момент времени регистрируется наводка

Расчёт групповой скорости распространения даёт значение 5,24 км/с, следовательно, через 10 мс после запуска, ультразвуковой импульс преодолевает расстояние более 52 метров в результате 100 двойных отражений, см. рис. 2. Естественно, что в результате затухания и дисперсии уменьшается полный размах амплитуды импульсов. Уменьшение происходит приблизительно в 7 раз, в основном в результате дисперсии, «размывающей» импульс в протяжённый пакет длительностью более 80 мкс, при этом интервал между пакетами составляет те же 98 мкс, требуемые для пробега по образцу. Измеренные через 20 мс импульсы имеют ещё меньший размах амплитуды, являются более растянутыми во времени и поэтому не приводятся.

Спектры отдельных импульсов, полученные Фурье преобразованием, представлены на рис. 3.



Рисунок 2 — Ультразвуковые импульсы, зарегистрированные через 10000 мкс пробега



Рисунок 3 — Нормированные спектры ультразвуковых импульсов

Анализ спектров показал, что возбуждаются импульсы в полосе менее 1 МГц. Уменьшение происходит во всём спектре, при этом сохраняется положение максимума, соответствующего частоте 250 кГц, для которой затухание на расстоянии 50 м составило ~ 6д Б, а для частоты 150 кГц ~ 4,5 дБ. Оценивая перспективы применения данного подхода для измерения длины намотки проволоки отметим возможность увеличения амплитуды возбуждающих импульсов тока и оптимизацию рабочей полосы частот; повышение соотношения сигнал шум приёмного тракта при усилении в полосе частот менее 500 кГц, что сделает перспективным измерения длин менее 200 метров.

Работа выполнена при поддержке Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований, проект № Т22УЗБГ-012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Митюрич Г.С. Определение модуля Юнга стальной проволоки оптико-акустическим методом // Труды Всероссийской акустической конференции. Материалы III Всероссийской конференции. – 2020. – С. 235–241.

ЛАЗЕРНЫЙ УЛЬТРАЗВУК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ В СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Григорьев А.Я.

Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь, vkozhushko@mpri.org.by

В работе исследован процесс отверждения эпоксидной смолы, соединяющей сэндвич-структуру из двух слоёв алюминия. Важным технологическим параметром при формировании такой структуры является время полимеризации смолы. При ее отверждении меняются физико-механические свойства системы, в частности, жесткость, что влияет на скорость прохождения через нее звуковой волны. Измерение характеристик пропускания ультразвука такой структурой может быть использовано для решения задач контроля качества адгезионных соединений и наблюдения за процессом полимеризации связующего. В данной работе эта задача решалась путем возбуждения ультразвуковых импульсов лазерным облучением алюминиевой поверхности сэндвич-системы и последующей регистрацией пьезоэлектрическим преобразователем прошедшего ультразвука. Такой подход позволяет бесконтактно возбуждать широкополосные ультразвуковые импульсы и проводить анализ с высоким разрешением. Импульсы давления при этом временным можно измерять традиционными контактными или иммерсионными методами [1].

Цель работы — показать возможность применения лазерного оптикоакустического метода для оценки изменений механических свойств, происходящих в металлополимерной структуре в процессе отверждения связующего слоя.

Исследовалась металлополимерная структура, образованная двумя алюминиевыми пластинами Д16, соединенными слоем двухкомпонентного эпоксидного клея Scotch (3M, Тайвань), полимеризация которого происходила во время эксперимента. Толщина слоев алюминия равнялась 2 мм, слоя эпоксидной смолы — 1,3 мм. Двухкомпонентный эпоксидный клей Scotch размещался между алюминиевыми пластинами, разделенными стальной шайбой с внутренним диаметром 8 мм и толщиной 1,3 мм. Шайба фиксировала расстояние между пластинами. Во внутренний объем шайбы помещали смолу, полимеризация которой протекала при температуре 22 °C.

Измерение возбужденных лазером ультразвуковых импульсов выполнялось иммерсионным методом по теневой схеме, представленной на рис. 1.



Рисунок 1— Схема эксперимента для возбуждения и измерения ультразвука, прошедшего слоистую металлополимерную структуру

Излучение лазера LS-2131М-10 (Лотис ТИИ, Беларусь), работающего в режиме модулированной добротности, освещало верхнюю алюминиевую пластину. Энергия одиночного лазерного импульса составляла 20 мДж, а длительность не превышала 12 нс. Возбужденный зондирующий импульс давления, распространялся к тыльной

стороне системы, где ультразвук регистрировался широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем на основе поляризованной пленки поливинилиденфторида (ПВДФ), толщиной 25 мкм (Piezotech, США). Встроенный в корпус преобразователя предварительный усилитель обеспечивал регистрацию в широкой полосе частот с верхней границей, достигающей 90 МГц.

Поглощение излучения лазера с длиной волны 532 нм в металле происходило по площади светового пятна на глубине не более нескольких десятков нанометров, что приводило к локальному нагреву приповерхностного объема, его расширению и термоупругим напряжениям, релаксация которых вызывала ультразвуковые импульсы. За время действия лазерного импульса (<15 нс) тепло проникало в объем алюминия, на глубину приблизительно 1 мкм. Плотность мощности лазерного излучения не превышала 10 МВт/см², что соответствовало термоупругому режиму возбуждения ультразвука. Без фокусировки излучения в термоупругом режиме оптико-акустического преобразования, продольные волны возбуждаются наиболее эффективно по сравнению со сдвиговыми, поверхностными и пластиночными волнами. В проводимых экспериментах диаметр лазерного пятна был равен 5 мм, диаметр чувствительного элемента пьезоэлектрического преобразователя составлял 3 мм, что позволило пренебречь влиянием дифракции при распространении через сэндвич-структуру.

толщиной между Слой дистиллированной воды 2 мм структурой И пьезоэлектрическим преобразователем обеспечивал акустический контакт. Для осциллограф регистрации импульсов использовали цифровой запоминающий DS1104Z (Rigol, KHP), при его двух задействованных каналах частота оцифровки составляла 500 МГц. Триггером осциллографа служил нарастающий фронт электрического сигнала PIN фотодиода S5971 (Hamamatsu, Япония), что определяло момент облучения металлической поверхности и запускало синхронизацию для отсчета времени распространения ультразвука через структуру к ПВДФ приемнику.

В ходе эксперимента для последовательности измеренных оптико-акустических сигналов энергия лазерных импульсов была зафиксирована на уровне 20 мДж, что обеспечивало условия стабильного возбуждения ультразвука в алюминии. Отверждение эпоксидной смолы вызывает увеличение акустических упругих модулей и акустического импеданса материала. Определение степени изменения механических характеристик смолы в процессе полимеризации осуществлялось по времени распространения ультразвуковых импульсов через сэндвич-структуру. Измерение проходящего ультразвукового сигнала проводили с изменяемым интервалом времени цифровым осциллографом.

Форма регистрируемого ПВДФ преобразователем ультразвукового давления представляла собой двухполярный импульс, начинающийся положительным и заканчивающимся отрицательным пиком с характерным нисходящим фронтом между ними. Время пробега ультразвука через слоистую структуру определяли по средней точке нисходящего фронта импульса давления. Полученные зависимости для структуры алюминий–эпоксидная смола–алюминий собраны на рис. 2, где для наглядности представлены только части сигналов, перекрывающие нисходящий фронт.

Через 5 минут после изготовления слоистой структуры установлено время прибытия первого зарегистрированного импульса в серии измерений, которое находится правее 2,62 мкс, полный размах амплитуды (максимум положительного пика – минимум отрицательного пика) этого импульса составляет порядка 10 мВ. По истечении 30 мин происходит смещение времени прибытия влево и увеличение полного размаха амплитуды импульса до 20 мВ. Через час происходит дальнейший рост амплитуды импульсов до 35 мВ. Зарегистрированный через 7 ч сигнал имел полный размах амплитуды приблизительно 60 мВ. Таким образом, в измеренной последовательности нисходящих фронтов импульсов давления, зарегистрированных во время полимеризации, происходит их постепенное смещение влево с увеличением полного размаха амплитуды, что объясняется изменением механических свойств слоя эпоксидной смолы. Справочное значение скорости ультразвука в отвержденной эпоксидной смоле составляет 2,5 км/с. По результатам последовательности измерений установлено уменьшение времени до регистрации нисходящего фронта первого импульса на 100 нс, что при известной толщине слоя эпоксидной сломы позволяет оценить скорость ультразвука в неотвержденной смоле, которая приблизительно равна 2,0 км/с. Полимеризация приводит к увеличению скорости, связанному с повышением жесткости смолы. Скорость также влияет на акустический импеданс, который равен произведению плотности и скорости звука в материале. Справочное значение импеданса алюминия составляет приблизительно 17×10⁶ Па·с/м, отвержденной эпоксидной смолы — 2,95×10⁶ Па·с/м. Увеличение импеданса смолы снижает потери на отражение при прохождении границ раздела полимера и слоёв алюминия.



Рисунок 2 — Изображения фронтов оптико-акустических импульсов, прошедших слоистую структуру алюминий–эпоксидная смола–алюминий, последовательно измеренные в процессе полимеризации

Таким образом, показано, что измерение амплитудной зависимости оптикоакустических сигналов позволяет наблюдать процесс отверждения эпоксидной смолы и время приобретения ей заданных механических свойств. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологического процесса изготовления сэндвичпанелей, а в перспективе — использовать разработанный метод для оценки механических свойств адгезива и качества клеевого соединения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных Исследований по программе БРФФИ-МИРРУ, договор № Т22УЗБ-069.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Laser optoacoustic method for detecting violations in the periodicity of the structure of carbon fiber reinforced plastic composites // Acoust. Phys. – 2022. – Vol. 68. – P. 408–414. – doi: 10.1134/S106377102204011X

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ ИЗ РАСТВОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Винокуров С.А., Классен Н.В., Цебрук И.С., Орлов А.Д., Кедров В.В., Киселев А.П. Институт физики твердого тела Российской академии наук klassen@issp.ac.ru

В данной работе изучались процессы кристаллизации водорастворимых сцинтилляторов при воздействии электрических полей. Сцинтилляторы – это вещества, которые, поглощая энергию ионизирующих излучений от попадающих в них гамма - квантов или элементарных частиц, часть этой энергии излучают в виде световых вспышек (которые и называются сцинтилляциями). Регистрация этих вспышек – наиболее часто употребляемый во многих научных, медицинских, технических устройствах способ диагностики радиационных потоков. От требуется обширный сцинтилляционных кристаллов набор эксплуатационных характеристик - чувствительность, быстродействие, энергетическое разрешение (т.е. точность определения энергии захваченной сцинтиллятором частицы по энергии световой вспышки), радиационная прочность и т.д. По совокупности этих параметров определяется качество сцинтиллятора. На данный момент лучшим сцинтиллятором считается бромид лантана, активированный церием. На него большой и пока еще не удовлетворенный спрос от разработчиков устройств медицинской диагностики, радиационного мониторинга, дефектоскопии материалов и изделий, геологоразведки и т.д. Проблемы обеспечения мировых потребностей в бромиде лантана, прежде всего, определяются его высокой восприимчивостью к неблагоприятным внешним воздействиям: атмосферной влажности (на открытом воздухе кристалл бромида лантана за несколько минут впитывает столько атмосферной влаги, что преобразуется в желеобразную каплю) и механическим напряжениям. Поэтому и производство, и эксплуатация бромида лантана – процессы технически сложные и дорогостоящие. У бромида лантана и двух других популярных сцинтилляторов (сульфата и иодида цезия) – высокая растворимость в воде, что считается их серьезным недостатком, требующим защиты кристаллов от атмосферной влаги. Мы в данной работе пытаемся использовать этот недостаток для улучшения технологических и эксплуатационных характеристик этих кристаллов.

Первая группа экспериментов – кристаллизация указанных кристаллов из их водных растворов в электрическом поле умеренной величины (напряженностью порядка 100 в/см). Процессы кристаллизации проводились из насыщенных водных растворов и регистрировались через оптический микроскоп видеокамерой. Было установлено, что приложение к растворам постоянного поля указанной величины многократно ускоряет процесс кристаллизации. Если при выращивании этих кристаллов из расплава или раствора «электронейтральными» способами скорость роста монокристаллов - не выше 30 микрон в час, то в электрическом поле она увеличилась на три с лишним порядка, достигнув приблизительно 30 микрон в секунду. При этом в зависимости от конфигурации электродов и соответствующего пространственного распределения электрического поля возможно получение кристаллов игольчатой, стержневой и пластинчатой форм. Оказалась реальной возможность формирования кристаллов с заданным профилем поперечного сечения. Это особенно эффективно при производстве сцинтилляторов для матричных радиационных детекторов. Обычно эта процедура состоит из нескольких стадий: сначала выращивается кристалл большого поперечного сечения. Затем он раскраивается на элементы требуемых размеров, а далее эти элементы собираются в матрицу. В нашей модифицированной методике, возможно, не только выращивать

сразу пучок кристаллов, но и формировать их непосредственно внутри матричных оболочек.

Но в таких кристаллах сразу после выращивания присутствуют остаточные молекулы воды. Они вредны по трем характеристикам: снижают световыход сцинтилляций за счет безызлучательной рекомбинации электронных возбуждений, ухудшают энергетическое разрешение из-за создания внутренних структурных неоднородностей И из-за этих неоднородностей увеличивают вероятность растрескивания под действием термоупругих, вибрационных, динамических и прочих механических напряжений. Наиболее восприимчивы к негативному действию воды кристаллы бромида лантана, которые образуют с ней кристаллогидраты. Нами было установлено, что приложение к бромиду лантана, напитавшемуся водой, умеренного электрического поля (100 в/см) «выдавливает» из приповерхностного слоя кристалла толщиной до 0,5 мм воду за характерные времена порядка 10 – 30 секунд. Далее процесс выдавливания прекращается, и вода начинает впитываться обратно. Возникают автоколебания локального содержания кристаллогидратной воды. Выдавливание ее из кристаллогидрата в начальном состоянии объясняется высокой диэлектрической проницаемостью свободной воды. За счет этого она эффективно экранирует электрические поля, снижая электростатическую энергию. Время удаления воды определяется скоростью ее диффузионной миграции внутри кристалла, т.к. разница в электростатических энергиях свободной и связанной воды проявляется только в нескольких приповерхностных атомарных слоях. В этой связи становится актуальным выдавливание воды из кристалла не постоянным, а переменным электрическим полем оптимально подобранной частоты, на которой усиливаются диффузионные процессы молекул воды. На разницу электростатических энергий свободной и связанной воды это не должно повлиять значительно. Но BO взаимодействии гидратированной воды и окружающей кристаллической среды можно ожидать проявления резонансов звукового диапазона, т.к. ускорение диффузионных процессов акустическими колебаниями хорошо известно. Поэтому изучение частотных характеристик электроакустических воздействий на поведение воды в бромиде лантана способно привести к совершенствованию технологии и улучшению свойств сцинтилляционного бромида лантана.

Электрические воздействия процесс кристаллизации на оказались продуктивными и при формировании сцинтилляторов из композиций органических люминофоров и неорганических наночастиц. Ранее нами на примере композиций из активированного полистирола и наночастиц сульфата цезия было показано, что при оптимальном соотношении их концентраций удается объединить достаточно высокую эффективность и быстродействие органического люминофора с поглотительной способностью гамма – квантов и радиационной прочностью неорганики. Но у данного композита был минус, связанный с его оптической неоднородностью. За счет этого происходило сильное рассеяние сцинтилляционного света, в результате чего его применение было проблематично. Формированием сцинтилляционных композитов из активированного полистирола и неорганических наночастиц в электрическом поле удалось получить регулярную структуру с периодом, сопоставимым в несколько длин волн света. В такого рода структуре оптическая неоднородность может не только не ослаблять, но и наоборот, усиливать световыход сцинтилляций в направлении на фотоприемник за счет правильно организованных волн рассеянного света (рис.1). Варьированием величины и частоты электрического поля, а также параметров исходных компонентов (размерами и концентрацией наночастиц, состава полимерного люминофора) в принципе, возможно, добиться наиболее оптимальной структуры такого сцинтилляционного композита.



Рисунок 1 — Электронная микроскопия периодической структуры из композиции бромида лантана с полистиролом, сформированной в электрическом поле

Следует подчеркнуть, что образование композита из бромида лантана с полистиролом способно не только улучшить светоизлучательные свойства такого сцинтиллятора, но и устранить недостатки бромида лантана в виде высокой гигроскопичности и низкой трещиностойкости. При этом технологический процесс формирования такого рода композитов значительно проще и быстрее по сравнению с выращиванием монокристаллического бромида лантана, что делает ее значительно экономичнее.

О РОЛИ АКУСТИКИ В ДЕФОРМАЦИОННОЙ АКТИВАЦИИ СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУР ОРГАНИКА - НЕОРГАНИКА

Цебрук И.С., Классен Н.В., Кедров В.В., Покидов А.П. Институт физики твердого тела Российской академии наук cebruk@issp.ac.ru

Наноструктуры из органических полимеров и неорганических наночастиц представляют интерес и для выявления новых фундаментальных закономерностей поведения конденсированных сред, И для практических применений этих закономерностей. В наноразмерных композициях органика – неорганика относительное количество атомов на границах между этими компонентами становится достаточно большим для заметного влияния на общие свойства композиций. Поэтому их изучение дает информацию о качественно новых материалах, где перемешаны атомы и молекулы из веществ, ранее изучавшихся только по отдельности. Пример продуктивности такого перемешивания был получен в ИФТТ РАН при формировании сцинтилляционных композиций из активированного полистирола как органического люминофора и неорганических сцинтилляторов из наночастиц сульфата цезия. Полистирол состоит из легких атомов водорода, углерода, кислорода. Его возбужденные электронные состояния быстро и с хорошей эффективностью преобразуют свою энергию в световые фотоны. Наночастицы содержат значительную долю тяжелых атомов. За счет этого они эффективно поглощают энергию ионизирующих излучений. Но излучение ими световых фотонов идет гораздо медленнее и слабее. Легкие атомы органики после поглощения гамма квантов их электронами гораздо сильнее смещаются из равновесных положений, что ослабляет прочность. Составление композиций радиационную органика _ неорганика «перемешивает» их свойства. Наши эксперименты показали, что удается найти такие приемы перемешивания компонентов, когда в композите их лучшие свойства превалируют, а худшие – нивелируются.

Такое тесное взаимодействие между органикой и неорганикой в наноструктурах может выгодно проявляться не только в радиационных детекторах. Например, о по теории Бардина –Купера- Шриффера (БКШ) температура сверхпроводящего перехода в металлических проводниках определяется силой электрон – фононного взаимодействия и, соответственно, амплитудой фононных колебаний. Так как в органике из легких атомов такая амплитуда значительно выше, а в тяжелых атомах неорганики, но гораздо больше электронов. для создания хороших сверхпроводников интересно сочетание наноструктур из органики и неорганики, где токовый перенос зарядов будет производиться электронами неорганики, а их связывание в сверхпроводящие состояния обеспечили бы фононы органики.

Наши эксперименты показали, что деформационные воздействия на смеси органики и неорганики способны активировать образование сильных связей между их атомами. Такие воздействия производились несколькими методами. В первом случае в неорганические кристаллы внедрялись молекулы полистирола путем шариковой обкатки. Во втором из раствора полистирола, в который были введены неорганические наночастицы, вытягивались микроволокна. При быстром отверждении вытягиваемых струй происходило сжатие волокна, а возникающая при этом деформация индуцировала образование сильных связей органики и неорганики.

Деформационная активация этих связей подтверждается колебательной спектроскопией инфракрасного поглощения композитов органика - неорганика. По изменениям спектров поглощения связей углерод – углерод и углерод – водород в композитах полистирола с иодидом и сульфатом цезия. а также с бромидом лантана можно заключить, что при деформационных воздействиях на композиции из этих солей и полистирола изменяются межатомные колебательные частоты как в линейных участках, так и в бензольных кольцах полистирола. Это можно объяснить тем, что

входящие в состав этих солей галогены и сера являются сильными окислителями и при деформациях исходных конфигураций способны, например, занимать места водорода, примыкавшего к углеродам бензольных колец. Вызванные этим изменения частот в таком случае должны происходить по всему колебательному диапазону - от инфразвуковых до инфракрасных частот. Такие изменения способны заметным образом влиять на процессы структурных превращений. Например, при шариковой обкатке неорганических кристаллов с нанесением полистирола на обкатываемую поверхность мы наблюдали аномально глубокое и быстрое проникновение полистирола в кристаллы на расстояния до ста микрон от поверхности. В одних ситуациях это происходило постепенно, но наблюдались и аномальные импульсные «втягивания» полистирола за десятые доли секунды. Это можно объяснить тем, что при связывании контактирующих друг с другом атомов полистирола и неорганического кристалла возникают новые состояния с качественно отличными электронными и колебательными спектрами. В таком случае при вводе упругой деформации в такую гетерогенную группу атомов становится возможным распространение по ней концентрированного потока энергии, который из-за расхождения частот С окружающими средами не рассеивается в стороны. За счет такой концентрации и происходит быстрый массоперенос на большие глубины. В данном случае образование групп атомов с резко выделенным спектром колебательных частот может быть обусловлено связями тяжелых атомов неорганических наночастиц с легкими атомами полистирола (например, когда вместо связи углерод – водород в бензольном кольце образуется связь углерод – йод. Такая связь за счет отличий в энергии и эффективной массе может существенно отличаться по частоте как от полистирола, так и от иодида цезия. За счет этого вдоль поверхности раздела между полистиролом и иодидом цезия колебания связей углерод – йод могут распространяться без заметного рассеяния в стороны, индуцируя образование новых идентичных связей углерода из полистирола с йодом из иодида цезия.

Такого рода процесс концентрированного переноса энергии колебаний вдоль поверхности раздела может быть причиной не только аномально быстрых и сверхглубоких проникновений инородных атомов молекул глубину И в приповерхностных слоев кристаллов при их обработке шариковой обкаткой, но и объяснить быстрое формирование микронитей бромида лантана, наблюдающееся при формировании волокон полистирола из раствора, в который введены его частицы. Индуцированная вытягиванием деформация молекул полистирола вызывает связывание его бензольных колец с атомами брома на поверхности частиц. Энергия, выделяющаяся при таком связывании, не рассевается в виде тепла, а вызывает локализованные колебания пар бром – углерод на поверхности раздела. Энергия этих колебаний активирует связывание следующего бензольного кольца со следующим атомом брома и так далее. В итоге вдоль молекулы полистирола движется эстафетное связывание его бензольных колец с поверхностью бромида лантана. А так как в это время происходит вытягивание молекул полистирола. они увлекают за собой связанные с ними фрагменты бромида лантана. В результате трехмерная частица бромида лантана расшепляется на пучок микронитей, связанных с идушими вдоль них молекулами полистирола. Оптическая и электронная микроскопия таких волокон показали, что эти нити формируют параллельные оси волокна пучки, внутри которых нити распределены регулярным образом с периодами микронного масштаба. Формирование периодического распределения микронитей в перпендикулярном оси сечении волокна можно объяснить акустическим взаимодействиями между соседними нитями, носителями которых являются колебания окружающего полистирола. Аналогичным путем формируются и инвертированные периодические распределения протяженных внедрений полистирола в кристаллы галогенидов шариковой обкаткой. То есть деформационные внедрения и галогенидов в полистирол, и, наоборот, полистирола в галогениды, происходящие аномально быстро и глубоко с формированием периодических сверхструктур, можно считать результатами

деформационной активации межатомных связей этих материалов, характеризуемых специфическими спектрами акустических колебаний.

Так как образование наблюдаемых в этих материалах гетероструктур происходит с участием собственных акустических колебаний, подобными процессами можно управлять введением в обрабатываемые композиции акустических колебаний от внешнего источника. Это позволяет расширить диапазон характеристик, формируемых таким образом гетероструктур органика – неорганика, востребованных многими техническими применениями. Один из относительно простых вариантов антикоррозионная защита металлоконструкций вкатыванием в их приповерхностные слои молекул водоотталкивающих полимеров (тефлона и др.). Это процесс, деформационным легированием, позволяет за несколько минут называемый обкаточной обработки сформировать в приповерхностном слое конструкций из стали или других металлов гидрофобную сверхструктуру. Так как молекулы, ее образующие, внедрены на глубину в десятки микрон, ни фрикционные, ни ударные воздействия на такую поверхность не будут способны их удалить (в отличие от применяемых сейчас окрасок или полимерных покрытий). Важно подчеркнуть, что такая обработка не требует каких-либо специальных условий и может производиться непосредственно по месту работы металлоконструкций. В том числе возможна антикоррозионная обработка подводных частей морских судов непосредственно под водой. Особенно это важно для арктического флота, так как там корпуса подвержены частым ударам и трению со стороны льдин. Аналогично можно производить антиобледенительную обработку проводов электропередач, которые нередко разрушаются под нагрузками намерзших на них наледей.

Кроме того, деформационная активация образования наноструктур в композициях органика - неорганика изучалось нами при воздействиях на них и электрического поля. В этих ситуациях также образуются связанные приграничные состояния, которые имеют заметные отличия от создаваемых механическим деформированием и по внешней морфологии, и по внутренним колебательным и электронным характеристикам переходных слоев.

Таким образом. возбуждение механическими, электрическими и ультразвуковыми воздействиями в композициях органика – неорганика акустических процессов позволяет формировать комбинированные сверхструктуры с широким диапазоном масштабов, физических и химических свойств. Например, формирование такого рода периодических гетероструктур в оптических или электронных материалах перспективно для создания новых видов лазерных излучателей, компонентов микроэлектроники и других оптических и электронных устройств. С другой стороны, создание в приповерхностных слоях изделий их хрупких материалов типа карбидокремниевой керамики периодических сверхструктур из внедренных шариковой обкаткой материалов, существенно повышающих их ударную вязкость, представляет интерес для повышения их трещинностойкости при сохранении жаропрочности.

АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Топоркова А.А.^{1,2}, Винокуров С.А.², Классен Н.В.², Аксенова Т.А.², Покидов А.П.² Высшая школа экономики, факультет физики ²ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук anna.toporkova@list.ru

В экспериментах по влиянию постоянных и переменных деформационных и электрических воздействий на живые растения и на отдельные их зеленые и древесные компоненты было установлено, что акустоэлектрические процессы играют важную роль как в жизнедеятельности растений, так и в получении от них полезных для практических применений функций и материалов.

При деформациях и древесных, и зеленых компонентов растений в них генерируются электрические потенциалы с амплитудами в несколько десятых в/см - в зависимости от величины и частоты деформации, от вида растения, от характера деформируемого компонента (ветка, стебель, лист) и даже от времени суток. С другой стороны, приложение электрических полей к компонентам растений вызывает заметные их деформации. Важно подчеркнуть, что численные значения, связывающие между собой величины деформаций и электрических полей, для действующих растений оказываются во много раз выше, чем в аналогичных экспериментах на широко применяемых для возбуждения и детектирования акустических колебаний неорганических пьезоэлектриках. Если же из показавшего рекордные пьезомодули растительного компонента тем или иным способом удалить жидкие биорастворы, пьезоизмерения дают резко уменьшенные величины, близкие к неорганике (хотя твердые пьезоэлектрические компоненты – прежде всего целлюлоза – остались на месте). Возвращение биорастворов восстанавливает и величины пьезомодулей. Это можно объяснить тем, что аномально сильные связи деформаций и электрических полей в действующих растениях обусловлены взаимно усиливающими друг друга синхронными колебаниями деформациями пьезоэлектрических стенок микрокапилляров, передающих питательные биорастворы, и перераспределениями ионных зарядов в этих растворах. Взаимосвязь в пьезоэлектриках между акустическими и электрическими колебаниями (электромеханические волны) хорошо известна и широко используется для узкополосных фильтров СВЧ и других электронных устройств. Главное назначение акустоэлектрических колебаний в растениях – перенос питательных веществ от корней к местам фотосинтеза (по капиллярам ксилемы), а продуктов фотосинтеза – от листьев по капиллярам флоэмы к местам формирования новой растительной массы. Этот механизм переноса, серьезно дополняющий хорошо известный транспорт под действием осмотического давления, работает на основе электромеханических взаимодействий в растительных пьезоэлектриках.

Как известно, питающие микрокапилляры растений перегорожены мембранами с ситовидными системами отверстий, которые в зависимости от локальной ситуации могут открываться или закрываться. Пьезоэлектрическая целлюлоза – основной компонент всех растительных мембран. Как ни странно, в большинстве публикаций по жизнедеятельности растений пьезоэлектричеству целлюлозы не придается должного внимания. Между тем оно может играть решающую роль в питающем массопереносе. Когда группа ионов (неорганических в виде положительных металлов, органических – в виде отрицательно заряженных белков и др.) приближается к мембране в нужном для переноса направлении, пьезоэлектрическая мембрана под действием их электрического поля открывается. После прохождения этой группы ионов через мембрану она действует на нее полем противоположного знака и поэтому мембрана закрывается, не позволяя ионам двигаться в «неправильном» направлении. Быстрое прохождение ионов через мембрану создает в боковой стенке капилляра электрический импульс, который генерирует в ней электромеханическую волну,

бегущую по стенке капилляра. Неоднородное электрическое поле этой волны двигает питательные вещества (как ионы, так и незаряженные молекулы) по капилляру к следующей мембране, а далее процесс повторяется многократно вплоть до их доставки к месту использования.

Предложенный механизм позволяет понять, как питаются деревья высотой более сотни метров, когда осмотического давления уже не хватает для подъема питательного раствора от корней на такую высоту. Кроме того, снимаются вопросы о механизме переноса по капиллярам флоэмы, где осмотического давления нет изначально. Важное следствие – возможность применения акустической обработки растений для борьбы с засухой. При облучении растений звуковыми волнами синхронными по частоте с электромеханическими волнами питающих капилляров выращиваемых на данном участке растений они будут всасывать дефицитную влагу из почвы с повышенной эффективностью, не позволяя ей «впустую» испаряться в окружающее пространство. Тем самым дефицит влаги можно будет ослабить не доставкой больших количеств воды для полива, а акустическим повышением эффективности использования влаги, которой понадобится значительно меньше и это будет гораздо дешевле.

Еще одно перспективное применение акустоэлектрической обработки растений водородная энергетика. Она способна стать эффективной альтернативой наиболее применяемым сейчас в энергетике процессам сжигания углеводородов, экологический вред которых становится все более ощутимым. Поэтому актуальны задачи разработки эффективных способов получения и аккумулирования водорода, т.к. применяемые в данное время электролиз воды и хранение водорода в сосудах высокого давления проблематичны с точки зрения экономичности и безопасности. В этой связи интересны процессы фотосинтеза растений, где энергетические процессы с участием извлечения и транспортировки водорода хорошо отлажены. Эксперименты, проводимые в ИФТТ РАН по электрическим и оптическим воздействиям на растительные материалы, подтверждают их перспективность для водородной энергетики. В качестве методик применяются, в частности, обработка постоянными и переменными электрическими целиковых зеленых листьев, растертой зеленой массы, диспергированных полями древесных микрокомпонентов. Обнаружено, что приложение электрического поля напряженностью порядка 100 в/см к водным суспензиям из зеленых и растительных компонентов приводит к ускоренному образованию микропузырьковой пены, зарождающейся у отрицательного электрода. Эти процессы усиливаются при облучении суспензий светом. Оптическая и электронная микроскопии суспензий выявляют наличие в них микроагломератов, состоящих из округлых и ограненных наночастиц с высокой концентрацией наноразмерных пор между ними. По зарождению агломератов отрицательного электрода образованию этих y И ИЗ них микропузырьковой пены можно предположить, что они включают в себя большое адсорбированного водорода. Исследования фотоэлектрических и количество электромеханических процессов в зеленых и древесных компонентах растений позволяют предложить варианты приводящих к этому процессов.

При наложении электрического поля как на микроволокна из стеблевых компонентов, так и на целиковые листья в них возникают осциллирующие электрические токи с характерными периодами от нескольких десятых секунды до десятков секунд. Похожие по динамике осцилляции электропотенциалов возникают при световом облучении зеленых листьев.

Лазерное облучение зеленых суспензий приводит в существенному измельчению их компонентов, определяемому по значительному уширению углового распределения светорассеяния. При этом облучаемая светом зеленая масса генерирует постоянные и переменные электропотенциалы амплитудами порядка 1 – 2 в/см. По ходу облучения оптической микроскопией зеленой массы обнаруживается формирование в ней оптически прозрачных анизотропных микропластинок размерами в несколько десятков микрометров. Такого рода воздействия на водные суспензии

древесных опилок приводят к превращению их в оптически прозрачные пучки параллельны микроволокон.

Оптическое облучение прежде всего действует на хлорофилл, заполняющий внутренние поверхности тилакоидных мембран. При этом освобождаются электроны, переносимые особыми белками на внешние стороны этих мембран. В то время протоны из водного раствора снаружи тилакоида захватываются за счет светового возбуждения другими белками мембраны и переносятся внутрь тилакоида. В результате такого разделения зарядов внутри тилакоида накапливается большая концентрация протонов и их взаимное кулоновское отталкивание разрывает первоначально замкнутую мембрану, превращая ее в микропластинку, с одной стороны которой накоплены протоны, а с противоположной – электроны. Такие микропластинки притягиваются друг к другу противоположно заряженными сторонами, образуя стопки с расположенными внутри слоями атомов водорода.

Освобождение и аккумулирование водорода с участием древесных компонентов растений акустоэлектрическими воздействиями можно объяснить поляризацией молекул лигнина, составляющих значительную часть стенок древесных клеток. В неполяризованном состоянии лигнин гидрофобен, т.к. его молекулы неполярны, а вода, наоборот, состоит из молекул с аномально большими дипольными моментами. Но поляризация молекул лигнина электрическим полями акустоэлектрических или световых волн индуцирует активное взаимодействие лигнина с водой, приводящее к его растворению. Водородные связи лигнина с целлюлозой разрываются, что приводит, в частности, к освобождению некоторой части водородных атомов. Тем самым, акустоэлектрическая обработка древесных отходов генерирует водорода не только усиленным электролизом воды, но и разложением лигнина. Освобожденный при этом водород с большой вероятностью может адсорбироваться точками целлюлозы, которые раньше использовались для образования водородных связей с лигнином.

Предлагаемый механизм генерации И аккумулирования водорода акустоэлектрическим разложением клеточных стенок древесины интересен не только для водородной энергетики, но и для экологически чистого производства целлюлозы, потребность в которой по мере перехода от синтетических полимеров в упаковках. посуде, электроизоляции и т.д. к биополисмерным продуктам быстро возрастает. Но само по себе производство целлюлозы из древесины по действующим сейчас технологиям представляет большую экологическую опасность, т.к. вырубаются для этого все большие площади лесов и губятся все большие площади вокруг целлюлознобумажных комбинатов продуктами кислотного и щелокового отделения целлюлозы от лигнина. Предлагаемая здесь методика экологически чиста, использует не деловую древесину, а требующие утилизации отходы лесозаготовок и деревообработки в виде веток, стружек и опилок. Количество таких ежегодно производимых отходов растущие потребности в целлюлозе. многократно обеспечит По нашим предварительным оценкам потребности в электроэнергии при акустоэлектрическом производстве целлюлозы значительно ниже по сравнению с действующими сейчас химическими процессами.

Таким образом, представленные выше методики способны улучшить ситуацию с экологией сразу по четырем направлениям: повышение эффективности генерации и аккумулирования водорода, сбережение лесов, экологичное производство целлюлозы и эффективная утилизация древесных отходов.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Кушнер Л.К., Кузьмар И.И., Гульпа Д.Ю., Дежкунов Н.В. Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, kushner@bsuir.by

С целью разработки высокоэффективных технологий электрохимического меднения сложнопрофилированных изделий, в том числе, многослойных печатных плат, исследованы закономерности процесса электроосаждения меди в сернокислом электролите при воздействии интенсифицирующих факторов.

Интеграция и миниатюризация изделий микроэлектроники, появление печатных плат с высоким соотношением толщины платы и диаметра отверстий обостряют проблему выравнивания металлизации на поверхности изделия и в отверстиях, обусловленную неоднородностью распределения плотности тока и, вследствие этого, катодной концентрационной поляризацией. Для получения качественных медных покрытий с высокой равномерностью распределения по поверхности и в отверстиях в технологии производства трехмерных структур использованы специальные добавки в сульфатные электролиты меднения, которые, адсорбируясь поверхностью в местах наибольших градиентов тока, образуют там барьерный слой, что приводит к перераспределению тока [1] и преимущественному осаждению в углублениях и отверстиях, и электролиз при воздействии ультразвука, который позволяет значительно улучшить массоперенос в отверстиях во время электроосаждения меди, тем самым повысить качество заполнения глухих отверстий.

Для обоснования использования выравнивающих добавок и ультразвука при нанесении медных покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами проведено исследование методом вольтамперометрии кинетических особенностей электродных процессов, изучение быстропротекающих электрохимических процессов на границе «электрод-электролит, позволяющее выяснить механизм и основные закономерности их протекания, установить связь между условиями электролиза и свойствами получаемых электрохимических покрытий. Поляризационные кривые снимались в потенциодинамическом и гальваностатическом режимах потенциала с помощью импульсного потенциостата-гальваностата «*Elins P-45X*». Для изучения влияния ультразвуковых колебаний (УЗК) на процесс меднения использовали ультразвуковую ванну со следующими параметрами: частота ультразвуковых колебаний 38 кГц, мощность акустическая 15 Вт, потребляемая мощность 40 Вт. Интенсивность (амплитуда) ультразвука изменялась от 0,07 до 1,64 Вт/см².

Для меднения двусторонних печатных плат при повышенных плотностях тока, а также для меднения изделий под дальнейшее никелирование и хромирование предложен электролит, позволяющий получать равномерные блестящие пластичные покрытия при высокой плотности тока. Осаждение проводили в электролите, содержащем 150 г/л сульфата меди, 140 г/л серной кислоты, 0,06 г/л хлористого натрия и комплексную выравнивающую добавку.

Исследование кинетических закономерностей процесса меднения показало, что зависимость потенциала катода от плотности тока подчиняется уравнениям смешанной кинетики (рис. 1). Возникновение диффузионных ограничений скорости осаждения обусловливают появление второго предельного тока. Перемешивание электролита без добавок и, в меньшей степени, ультразвук снижают перенапряжение выделения меди и увеличивают предельный ток, подтверждая диффузионный характер второго предельного тока (рис. 1а).

Введение в электролит комплексной добавки, включающей смачивающий, блескообразующий и выравнивающий компоненты, вследствие адсорбции поверхностно-активных веществ приводит к повышению поляризации катодного процесса на 57-95 мВ и некоторому увеличению предельного тока (рис. 1б). При перемешивании электролита с добавками наблюдается рост катодной поляризации, усиливающийся с увеличением скорости перемешивания. Установленное усиление ингибирование процесса осаждения при ускорении подачи добавок является подтверждением адсорбционно-диффузионного механизма выравнивания поверхности, т.е. электролит обладает выравнивающей способностью и может быть использован для металлизации глухих отверстий.



Рисунок 1 – Влияние состава электролита и режима электролиза на поляризационные характеристики процесса меднения: а – электролит без добавок; б и в – электролит с добавками

С увеличением интенсивности УЗК наблюдается снижение перенапряжения выделения меди и рост предельного тока (рис. 1в), причем при I_{УЗК}>1 Вт/см² площадка предельного тока отсутствует. Это обусловлено дегазацией электролита и его интенсивным перемешиванием в ультразвуковом поле за счет возникновения акустических течений, вызывающих унос ионов из двойного электрического слоя (ДЭС) (в первую очередь из его диффузионной части) [2] и уменьшение его толщины, что обеспечивает высокую скорость переноса вещества диффузией к поверхности электрода, а, следовательно, увеличение допустимой плотности тока осаждения, заметно повышается выход металла по току и скорость зародышеобразования (рис. 2). Снижение пористости и формирование покрытия с более однородной структурой при ультразвука, уменьшение воздействии содержания примесей, активирование поверхности, перемешивание и дегазация электролита приводит к повышению коррозионной стойкости, особенно при высокой плотности тока, что позволяет интенсифицировать процесс электролиза за счет увеличения рабочей плотности тока и повысить качество осадков.

Исследование влияния ультразвуковых колебаний на стационарный потенциал показало, что он зависит от состава электролита. С увеличением концентрации сульфата меди с 80 до 150 г/л при воздействии ультразвука наблюдается повышение положительного значения потенциала от 98 до 118 мВ. Ультразвуковые колебания вызывают сдвиг потенциала соответственно на 11 и 4 мВ, что можно объяснить тем, что с увеличением концентрации электролита толщина ДЭС уменьшается и действие акустических течений ослабляется, а также адсорбцией поверхностно-активных

веществ, входящих в состав добавки. С ростом интенсивности (амплитуды) колебаний скорость акустических течений также возрастает, что вызывает увеличение сдвига потенциала.



Рисунок 2 – Влияние ультразвука на выход по току и пористость медных покрытий (a), скорость зародышеобразования (б)

Исследование кинетических характеристик процесса меднения показало, что осаждение при воздействии ультразвука позволяет повысить ток обмена и коэффициент переноса (табл.).

Таблица –	Кинетические	характеристики	медного	катода	при	различных	условиях
осаждения в	в сульфатном з	электролите					

Усповия	Постоянн	ые Тафеля	Ток обмена, 10 ⁻⁴ А/см ²	Коэффициент переноса	
5 0010 000	a b		1	α	
без добавок	0,187	0,051	2,260	0,567	
с добавкой	0,227	0,062	2,040	0,471	
с добавкой и перемешивани ем	0,253	0,059	0,489	0,496	
с УЗК 0,12 Вт/см ²	0,235	0,057	0,789	0,508	
с УЗК 0,95 Вт/см ²	0,178	0,046	1,280	0,635	
с УЗК 1,64 Вт/см ²	0,139	0,037	1,700	0,786	

Проведенные исследования показали, что применение ультразвука позволяет интенсифицировать обмен электролита, улучшить смачиваемость стенок отверстий и удаление пузырьков воздуха во время электроосаждения меди. Использование разработанного электролита с выравнивающими добавками и осаждение при воздействии ультразвука позволяет снизить поверхностное натяжение электролита, значительно улучшить массоперенос в отверстиях, тем самым повысив качество заполнения глухих отверстий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.]; под ред. А. П. Достанко, В. Л. Ланина; Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск: Бестпринт, 2021. – 270 с.

2. Дежкунов, Н.В. Воздействие ультразвуковых колебаний на электродный потенциал / Н.В. Дежкунов, А.П. Корнев // ЖФХ. – 1991, - Т.65, №2, - С. 469 – 475.

ДИАГНОСТИКА ПЛАСТИН ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛН ЛЭМБА

Диденкулов И.Н.^{1,2*}, Муякшин С.И.^{1,2}, Чернов В.В.¹

¹Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия ²Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия *E-mail: diniap@mail.ru

Полимерные композитные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение. Критически важными конструкционными элементами из ПКМ являются тонкостенные пластины и оболочки. Важной задачей является обнаружение и локализация дефектов в них. Для ее решения наряду с традиционными методами ультразвукового неразрушающего контроля развиваются системы постоянного или инспекционного мониторинга состояния конструкций [1-3]. В работе экспериментально исследуется возможность обнаружения и локализации дефектов в тонких пластинах с помощью волн Лэмба на основе сравнения распределений сигналов по датчикам до и после появления дефекта [4].

Взаимодействие волн Лэмба с препятствиями в пластине подчиняется общим волновым закономерностям. При падении волны длиной λ на неоднородность с поперечником D на расстоянии R от нее, удовлетворяющем неравенству $R < D^2/\lambda$, формируется область частичной тени, где волна ослаблена. При увеличении расстояния из-за дифракции эта область расширяется и при $R > D^2/\lambda$ возникает сектор, где имеется определенная угловая зависимость амплитуды: в середине этой области ослабление максимально, к краям эффект уменьшается. Угловую ширину этого сектора можно оценить соотношением $\theta \approx \lambda/D$. Вычитая из полного поля, искаженного неоднородностью, опорное поле можно получить диаграмму рассеяния поля дефектом. При $D >> \lambda$ диаграмма рассеяния вытянута в направлении распространения падающего поля. Поэтому располагая приемники в пределах некоторого сектора за неоднородностью, и регистрируя угловое распределение амплитуды разностного поля, можно оценить направление на дефект.

Нулевая антисимметричная мода волны Лэмба представляет собой простую изгибную волну, а в нулевой симметричной моде смещение в пластине симметрично относительно средней линии пластины [5-6]. Фазовая и групповая скорости симметричной моды выше, чем антисимметричной. Поэтому возбужденный в пластине волновой импульс при распространении распадается на несколько сигналов, которые достигают приемника в разные моменты времени. Так как разные моды ослабляются неоднородностями по-разному, то первой задачей предварительной обработки принятых сигналов является выбор временных окон, в которых эффект максимален. В этих окнах и должен производиться их дальнейший анализ.

Экспериментальная установка представляла собой жесткую структуру, на которой по окружности с радиусом 150 мм с шагом по углу 30° было установлено 8 пьезоэлектрических преобразователей (ПП), которые использовались как приемники. В ее центре располагался излучатель такого же типа. Данная структура устанавливалась на исследуемую пластину из композитного материала. Акустический контакт ПП с пластиной обеспечивался с помощью вазелина. Излучались импульсы, состоящие из 3-5 периодов несущей частоты с амплитудой до 200 В. Аналоговые сигналы с приемных ПП подавались на 8-ми канальный цифровой осциллограф фирмы National Instruments типа NI PXI-5105. Программа сбора, обработки и отображения данных была разработана в среде NI LabVIEW.

Опыты показали, что на частотах около 100 и 200 кГц излучатель эффективно возбуждал в композитном материале антисимметричные (изгибные) и симметричные волны Лэмба со скоростями 1300 – 1500 м/с и 2000 – 2600 м/с, соответственно.

Ослабление этих волн составило примерно 0.6 – 1.0 дБ/см. Было установлено, что «медленная» изгибная мода хорошо ослабляется как отверстием, так и нагрузкой поверхности в виде массивного стального цилиндра. Это позволило использовать цилиндры различного диаметра в качестве имитаторов дефектов. Интересно отметить, что отверстия или имитатор слабо влияют на «быструю» симметричную моду.

Для проверки возможностей «просветной» локации был проведен ряд опытов с пластиной из композитного материала. В качестве неоднородностей использовались как 10 мм отверстие в пластине, так и имитаторы различных диаметров. Имитатор можно было устанавливать в нужное положение на пластине. В опытах амплитуды разностных сигналов измерялись во временных окнах, соответствовавших приходу изгибной (медленной) моды. На рисунке 1а показано распределение амплитуд разностных сигналов по приемникам при изменении углового положения дефекта. На основе таких данных можно определить направление на неоднородность как «центра тяжести» углового распределения разностного поля. На рисунке 1б показан результат расчета направления на неоднородность.



а

б

Рисунок 1 – Определение направления на неоднородность: а –распределение амплитуд разностных сигналов по приемникам для трех положений дефекта; б – оценка углового положения дефекта

В процессе измерений фиксировалась также задержка прихода рассеянного сигнала на приемник. При последовательном смещении дефекта от линии излучательприемник задержка времени прихода сигнала также увеличивалась. Можно получить следующую формулу для расчета расстояния от излучателя до неоднородности:

$$R = R_0 \frac{\left[(t_d / t_0)^2 - 1 \right]}{2 \cdot (t_d / t_0 - \cos(\theta - \theta_0))} , \qquad (1)$$

где t_d — измеренная задержка сигнала бистатического рассеяния зондирующего импульса на неоднородности, t_0 — задержка прямого сигнала. На рисунке 26 показаны расчетные и экспериментальные задержки принятых сигналов при нахождении отверстия на расстоянии 50 мм от излучателя. Соответствующее распределение амплитуд разностных сигналов показано на рисунке 2а. Измеренные задержки для приемников, находящихся в секторе от 60° до 180°, хорошо совпадают с расчетными, что показывает возможность определения расстояния от излучателя до неоднородности. Для этого найденное направление θ и задержки соседних приемников, а результаты усреднить.



Рисунок 2 – Определение расстояния до неоднородности: а – распределение амплитуд разностных сигналов; б – сравнение расчетных и экспериментальных задержек

Как видно из рисунка 2, при отклонении направления на приемник от направления на неоднородность задержка растет, а амплитуда разностного сигнала уменьшается. При этом точность определения задержки падает. Поэтому на практике использование описанного метода определения расстояния до неоднородности возможно для групп приемников, расположенных под небольшими углами относительно направления на неоднородность.

Рассмотренный в данной работе подход можно назвать «методом малоуглового бистатического дифференциального рассеяния». Такой метод дает возможность осуществлять диагностику тонких пластин из разных композитных материалов, включая определение положение дефекта.

Работа выполнена частично в рамках госзаданий FFUF-2021-0009, FFUF-2021-0011 ИПФ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qing Xinlin, Li Wenzhuo, Wang Yishou, Sun Hu. Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications // Sensors.- 2019.- V. 19. - P. 545-572.

2. Su Zhongqing, Ye Lin, Lu Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review // Journal of Sound and Vibration.- 2006.- V. 295.- P. 753-780.

3. Zhongqing Su, Lin Ye, Xiongzhu Bu. A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers // Composite Structures.-2002.- V. 57.- P. 465-471.

4. Муякшин С.И., Диденкулов И.Н., Вьюгин П.Н., Чернов В.В., Денисов Д.М. Исследование метода обнаружения и локализации неоднородностей в пластинах с использованием волн Лэмба // Акустический журнал.- 2021.- Т. 67.- № 3.- С. 270-274.

5. Lamb H. On wave in an elastic plate. // Proc. R. Soc. Lond. A.- 1917.- V. 93.-P. 114-128.

6. Викторов И.А. Физические основы применения волн Рэлея и Лэмба в технике. Москва: Наука, 1966.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Царенко Ю.В.^{*1}, Рубаник В.В.¹, Wang J.T.², Liu Y.²

¹ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г.Витебск, Беларусь ²Нанкинский университет науки и технологии, г.Нанкин, КНР ^{*}E-mail: labpt@vitebsk.by

Формирование ультрамелкозернистой и нанокристаллической структур методами интенсивного пластического деформирования (ИПД) оказывает значительное, а иногда коренное влияние на деформационное поведение и механические свойства металлов и сплавов, что позволяет считать ИПД весьма перспективным методом управления структурой и свойствами. Наибольший интерес к наноструктурированным материалам обусловлен не только их уникальными физическими свойствами, но и весьма высокими механическими свойствами: прочностью, пластичностью, износостойкостью.

Основой способа получения ультрамелкозернистой структуры материалов послужил метод интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением [1]. Однако данный метод не позволяет получать протяженные образцы с однородными физико-механическими свойствами. Поэтому нами выбран способ интенсивной пластической деформации, называемый «tube high-pressure shearing (t-HPS)», при котором процесс сдвига обусловлен трением между инструментом и образцом под высоким гидростатическим давлением, при этом плоскость сдвига параллельна радиусу конического образца во время процесса [2].

Нами разработано устройство (рисунок 1) для изготовления полых конических заготовок методом t-HPS с наложением ультразвука [3], которое содержит сопряженные по форме и выполненные с возможностью вращения друг относительно друга оправку и основание конической формы, снабженные верхней и нижней кольцевыми прокладками для предотвращения выдавливания заготовки, и расположенный соосно с ними гидропривод, соединенный с основанием.



Рисунок 1 – Устройство для t-HPS обработки металлов с наложением ультразвука:

- 1 ультразвуковой преобразователь,
- 2 концентратор ультразвуковых колебаний,
- 3 полый волновод резонансной длины,
- 4 вращающееся оправка,5 основание,
- 6 заготовка, 7 кольцевая прокладка

Ультразвуковая обработка образцов проводилась с амплитудой знакопеременных напряжений в образцах от 17,5 до 100 МПа. Обработка наноструктурных образцов никеля и меди выполнялась при различных усилиях поджатия в пучности напряжений волновода. Результаты механический испытаний образцов наномеди на растяжение представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Кривые растяжения образцов наномеди: 1 – без УЗО; 2 – после УЗО (17,5 МПа); 3 – после отжига

Из рисунка видно, что предел прочности образцов наномеди без УЗО несколько выше, чем после УЗО с амплитудой напряжений 17,5 МПа. Относительное удлинение при этом образцов, испытанных растяжением после УЗО имеет более высокие значения до 16 %. Кривая 3 на графике характеризует образцы после отжига, т.е. находящиеся в крупнозернистом состоянии. Относительное удлинение отожженных образцов меди превышает 50 %, предел прочности при этом не достигает 250 МПа.

Исследования показали, что предел прочности образцов наноникеля без УЗО несколько выше, чем после обработки ультразвуком. Следует отметить, что уровень прочностных свойств для никеля выше 1200 МПа является высоким результатом. Относительное удлинение при этом образцов, испытанных растяжением после УЗО имеет более высокие значения, достигая значения 11 %. В то время как у образцов без УЗО эта величина составляет около 7,5 %.

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

Результаты исследований физико-механических свойств наноструктурных образцов никеля и меди после ультразвуковой обработки показали, что после УЗО наноструктурных образцов наблюдается повышение пластических свойств и незначительное снижение предела прочности. Показано, что при малых амплитудах напряжений ультразвука наблюдается заметный рост микротвердости наноструктурных образцов, как меди, так и никеля, а дальнейшее увеличение интенсивности УЗО до 100 МПа приводит к снижению микротвердости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement // Progress in Materials Science, Vol. 51, No. 7, 2006, pp. 881-981.

2. Principles of severe plastic deformation using tube high-pressure shearing/Wang, J.T.; Li, Z.; Wang, J.; Langdon, T.G. // Scr. Mater. - 2012, Vol. 67. – pp. 810-813.

3. Устройство для изготовления полых конических деталей: патент ВҮ 12828 / Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Ван Цз.Т., Ли Чж. – Опубл. 28.02.2022.

СИНТЕЗ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА МЕТОДОМ СВС

Кулак М.М., Никифорова И.В., Самолетов В.Г.

Институт технической акустики НАН Беларуси, г.Витебск, Беларусь

С целью установления закономерностей процесса синтеза алюминидов титана при воздействии ультразвуковых колебаний была разработана установка, позволяющая изучать влияние УЗК на продукты синтеза (рисунок 1).



образец; 2 – реакционный сосуд; 3 – манометр; 4 – вентили; 5 – газовый баллон;
система сбора и обработки данных; 7 – ультразвуковой генератор УЗГ2-4М;
магнитострикционный преобразователь ПМС-15А-18; 9 – концентратор; 10 – волновод;
датчик амплитуды; 12 – печь; 13 – регулятор температуры; 14 – окно; 15 – система прижима

Рисунок 1 – Блок-схема лабораторного комплекса для исследования процесса CBC при ультразвуковом воздействии

Установка оборудована печью подогрева с системой автоматического поддержания температуры. Синтез исследуемого образца (1) проводили в реакционном сосуде (2) в среде аргона при давлении 1 МПа. Диапазон давления газовой среды можно варьировать в интервале 0.1-15 МПа.
Ультразвуковые колебания создавали при помощи магнитострикционного преобразователя типа ПМС-15А-18, рабочая частота 18 кГц (8), запитываемого от ультразвукового генератора типа УЗГ2-4М (7). Ультразвуковые колебания от преобразователя усиливали коническим концентратором (9) и передавали волноводу (10). Величину амплитуды колебаний можно регулировать в диапазоне 0-25 мкм. амплитуды колебаний волновода во Контроль время синтеза проводили электродинамическим датчиком проходного типа (11). В процессе экспериментов образец устанавливали на торец волновода (10). Время озвучивания образцов во время синтеза составляло 5 минут: от момента поджига до полного остывания образца. В работе использовали порошки титана и алюминия марок ПТМ, ПТОМ-1 и ПАП-1. Смешивание порошков осуществляли по стандартной методике. Относительная плотность образцов составляла 0.6 - 0.65.

На синтезированных образцах системы Ti-AI проводили анализ микроструктуры. Исследования проводили с помощью растрового электронного микроскопа.

На рисунке 2 приведена выявленная структура синтезированного состава Ti + 3,0 Al. Из рисунка видно, что на РЭМ-изображении скола CBC-материала состава Ti + 3,0 Al, зеренная структура не выявляется, она видна только вблизи пор при большем увеличении.



Рисунок 2 – Микроструктура образцов состава Ti + 3,0 AI после CBC при разном увеличении

Были исследованы образцы составов Ti-Al и 3Ti-Al. На рисунке 3 приведены микроструктуры образцов состава Ti-Al после CBC.



а) СВС без УЗК; б) ξ=5 мкм; в) ξ=10 мкм

Рисунок 3 – Микроструктура образцов состава Ті + АІ после СВС



а) СВС без УЗК; б) ξ=5 мкм; в) ξ=10 мкм

Рисунок 4 – Микроструктура образцов состава 3Ti + Al после CBC

Проведенные исследования показали, что наличие пор в исходной шихте играет значительную роль в процессах структурообразования конечного продукта.

Как видно из рисунков 2-4 количественные изменения содержания компонентов приводят к изменению величины зерна от 20 мкм до 8-10 мкм.

Наложение ультразвуковых колебаний в процессе синтеза приводит к изменению как размеров (от 10-12 мкм до 4-8 мкм), так и формы зерен. Распределение зерен по размерам становится более однородным. Структура зерен становится более равноосной.

Работа поддержана совместным проектом БРФФИ-НФЕНК-2022 № Т22КИ-043.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

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

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

Технологии, основанные на использовании ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности в качестве средств информационного и энергетического воздействия, получают все большее распространение [1-3]. Все известные ультразвуковые технологии реализуются при помощи универсальных или специализированных ультразвуковых технологических аппаратов, в составе которых обязательно присутствуют ультразвуковая колебательная система и ультразвуковой генератор для её питания.

Пьезоэлектрический преобразователь является основным узлом ультразвуковой колебательной системы, который обеспечивает преобразование электрических колебаний в механические колебания определённой частоты и требуемой мощности. В зависимости от особенностей реализуемого технологического процесса, объемов обрабатываемых сред возникает необходимость применения УЗ аппаратов различной мощности, при чем увеличение УЗ частоты воздействия, в силу геометрических особенностей, приводит к уменьшению мощности.

Попытка создания пьезоэлектрических преобразователей повышенной частоты (более 30 кГц) по схеме Ланжевена за счет уменьшения их продольного размера и увеличения диаметра пьезоэлементов технически не реализуема, поскольку эффективность формирования продольных колебаний резко падает из-за роста паразитных радиальных (точнее, диаметральных) колебаний. Практически установлено, что внешний диаметр пьезокерамических элементов в такой конструктивной схеме не может быть больше половины длины пьезоэлектрического преобразователя [4,5].

Поэтому практическая реализация известных процессов и новых технологий с максимальной эффективностью требуют создания и применения излучателей УЗ колебаний широкого диапазона частот (от 20 кГц до 100 кГц) и с максимально возможной мощностью.

Для создания высокомощных пьезоэлектрических преобразователей предложено суммировать энергию отдельных преобразователей основанных на схеме Ланжевена. На рисунке 1а представлен преобразователь Ланжевена.



 излучающая накладка; 2 – отражающая накладка; 3 – пьезокерамические кольца; а – преобразователь с двумя пьезоэлементами; б – преобразователь с четырьмя пьезоэлементами

Рисунок 1 – Эскиз полуволнового преобразователя Ланжевена

Конструктивно пьезоэлектрический преобразователь состоит из установленных последовательно, механически и акустически связанных между собой металлической

частотно-понижающей излучающей накладки (рис.1 поз.1) к излучающей поверхности которой присоединяется концентратор или бустер, двух пьезоэлектрический элементов (рис.1 поз.3), частотно-понижающей отражающей накладки (рис.1 поз.2).Для дальнейшего повышения мощности преобразователя увеличивают объем пьезокерамики – количества пьезоэлементов (рисунок 1б).

Однако в такой конструкции полуволнового преобразователя можно установить не более четырёх последовательно установленных пьезоэлементов, поскольку дальнейшее увеличение мощности преобразователя неэффективно из-за ухудшения условий охлаждения пьезоэлементов (средних) внутри пакета и снижения прочности отражающей накладки вследствие уменьшения ее толщины. В связи с этим возникает необходимость суммирования мощности отдельных пьезоэлектрических преобразователей.

Одной из схем суммирования мощности является концентрическое последовательное размещение нескольких преобразователей один за другим (рисунок 2).



1 – излучающая (отражающая) накладка; 2 – волновод; 3 – пьезокерамические кольца;



Такой способ увеличения мощности ограничен двумя длинами волн вследствие возникновения высоких механических напряжений в области пьезокерамических колец первой полуволны преобразователя относительно присоединенного концентратора.

Наряду с представленными выше способами, суммирование мощности можно осуществлять путем параллельного присоединения преобразователей на общую суммирующую полуволновую накладку (рисунок 3а).



При необходимости уменьшения габаритных размеров преобразователя полуволновая суммирующая накладка (рисунок 3а поз.2) с излучающими накладками 147

преобразователей может быть заменена на четвертьволновую суммирующую накладку (рисунок 3б поз.1).

Дальнейшее увеличение мощности может быть достигнуто за счет использования преобразователя радиальных колебаний в продольные колебания (рисунок 4).



Рисунок 4 – Схема параллельного суммирования мощности радиально-расположенных пьезоэлектрических преобразователей

При реализации схемы (рис.4а) сечение суммирующей накладки – преобразователя радиальных колебаний в продольные колебания – представляет собой правильный многогранник. К суммирующей накладке присоединяются отдельные преобразователи Ланжевена.

Преобразователи, построенные по такой схеме, имеют высокие механические напряжения в области присоединения преобразователя и суммирующей накладки. Для снижения механических напряжений, суммирующая накладка (рис.4а поз. 1) меняется на другую суммирующую накладку (рис.4б. поз.1). Такая конструктивная схема позволяет установить до 14 пьезопакетов, при обеспечении высокой амплитуды колебаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00121), https://rscf.ru/en/project/19-19-00121/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Tsujino, S. Ihara, Y. Harada, K. Kasahara, N. Sakamaki, Characteristics of coated copper wire specimens using high frequency ultrasonic complex vibration welding equipments, Ultrasonics. 42 (2004) 121-124.

2. V. N. Khmelev, A. V. Shalunov, R. S. Dorovskikh, V. A. Nesterov, R. N. Golykh and I. S. Kozhevnikov, Ultrasonic coagulation to improve the efficiency of the gas cleaning systems, 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2017, pp. 294-297.

3. E. Riera, J.A. Gallego-Juárez, T. Mason, Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams, Ultrason. Sonochem. 13 (2006) 107-116.

4. S. Lin, L. Xu, and *H.* Wenxu, A new type of high power composite ultrasonic transducer. J. Sound Vib. 330(7) (2011) 1419–1431.

5. H. Lais, P.S. Lowe, T.-H. Gan, and L.C. Wrobel, Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders, Ultrason. Sonochem. 45 (2018) 7–16.

КАВИТАЦИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЯХ

Дежкунов Н.В.¹, Рубаник В.В.², Наймарк О.Б.³, Минчук В.С.¹

¹УО Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь, dnv@bsuir.by ²Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, г. Витебск, Беларусь ³Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия

Известно, что эффективность концентрации энергии одиночным кавитационным пузырьком значительно выше, чем пузырьками в составе многопузырьковой кавитационной области [1]. Это выражается, прежде всего, в большей интенсивности вспышек звуколюминесценции (ЗЛ), больших температурах и давлениях, достигаемых при захлопывании пузырька. В работе [2], например, показано, что в водном растворе хлористого натрия в условиях многопузырьковой звуколюминесценции (МПЗЛ) число фотонов *N* в каждой вспышке оценивается величиной до 10⁴. Примерно в таких же условиях в экспериментах с однопузырьковой звуколюминесценцией (ОПЗЛ) *N* достигает 10⁵ - 10⁶ [1,3]. Оценки температуры, до которой разогревается парогазовая смесь внутри пузырька, дают значения 2000-6000 К для многопузырьковой ЗЛ [3,4] и 15000-30000 К или даже больше для однопузырьковой ЗЛ [5,6]. Отметим также, что согласно [2] вспышки ЗЛ генерирует незначительная доля пузырьков, присутствующих в кавитационной области.

Если бы удалось приблизить эффективность преобразования энергии кавитационными пузырьками в составе кавитационной области к эффективности преобразования энергии одиночным пузырьком, можно было бы ожидать значительного прогресса в области исследования воздействия кавитации на вещество. С другой стороны, в медицинских применениях ультразвука часто требуется ограничить интенсивность воздействия кавитации на биологические структуры.

В данной работе приводятся результаты исследования закономерностей генерирования звуколюминесценции в импульсном ультразвуковом поле. Детальное описание установки и методики исследований представлено в работе [7]. Эксперименты выполнены в фокусированном поле на частотах 0,72 МГц и 1,70 МГц. При исследовании зависимости интенсивности звуколюминесценции *L* от периода следования импульсов ультразвука *T* величину *T* меняли начиная с *T* = 2000 мс в сторону уменьшения до 3 мс. Длительность импульса т меняли увеличивая т от 1 мс до 100 мс.

На рисунке 1 представлены зависимости выходного сигнала фотоумножителя, регистрирующего ЗЛ, от *T* и *r* для различных напряжений *U* на излучателе. Из представленных графиков видно, что при увеличении интенсивности ультразвука максимум интенсивности ЗЛ смещается в сторону больших *T* (рис. 1а) и меньших *r* (рис. 1б).

С ростом *т* и уменьшением *T* уменьшается время между двумя импульсами *T* - *т*. В результате при достаточно большом *t* (или малом *T*) за время между двумя последовательными импульсами размеры образовавшихся пузырьков не успевают уменьшиться до размеров меньше резонансного, а также осколки захлопнувшихся пузырьков не успевают отдалиться друг от друга на такое расстояние, чтобы с началом следующего импульса не слиться в один и не образовать зародыш достаточно большого размера. Поэтому концентрация активных пузырьков в кавитационной области при увеличении *t* и уменьшении *T* увеличивается, что вначале приводит к росту *L*.

Наличие максимума на зависимостях *L*(т) и *L*(Т) обусловлено конкурирующим влиянием двух факторов, связанных с увеличением концентрации С кавитационных полостей и их размеров в кавитационной области. Это увеличение числа кавитационных событий (коллапсов) в единицу времени, с одной стороны, и уменьшение эффективности концентрации энергии пузырьками при захлопывании при слишком большой концентрации пузырьков – с другой.



а)
 τ = 3 мс, б) T = 75 мс. U = 30В (1), 50 (2), 75 (3) и 120В (4),
 N = τ/T – обратная скважность



При $r < r_{max}$ и $T > T_{max}$ преобладающим фактором является рост числа кавитационных событий; интенсивность ЗЛ в этом диапазоне T и r растет с ростом r и уменьшением T. При $r > r_{max}$ и $T < T_{max}$ преобладающим становится второй фактор – уменьшение эффективности преобразования и концентрации энергии пузырьками что приводит к уменьшению интенсивности вспышек ЗЛ. В этом случае кавитационная область уже в самом начале импульса ультразвука достигает состояния, близкого к насыщению и дальнейшее увеличение числа кавитационных полостей и их размеров приводит к уменьшению активности кавитации, выражающемуся в уменьшении интенсивности зЛ. При увеличении интенсивности ультразвука, очевидно, увеличивается и скорость роста кавитационных пузырьков, что является причиной смещения максимума L в сторону больших T (рис. 1а) и меньших т (рис. 16).

По мере уменьшения скважности *Т/т* режим работы излучателя приближается к непрерывному. Из представленных данных видно, что выбор оптимальных параметров *T* и *r* при заданном напряжения *U* на излучателе обеспечивает существенное увеличение интенсивности вспышек звуколюминесцении.

В результате проведенных исследований показано также, что в импульсном ультразвуковом поле инерционная кавитация, приводящая к генерированию звуколюминесценции, возникает при определенных условиях со значительной задержкой по отношению к моменту включения ультразвука. Время задержки может варьироваться от долей секунды до нескольких минут в зависимости от интенсивности ультразвука и параметров импульсов. Эксперименты выполнялись в следующем порядке. Включали ультразвук в непрерывном режиме и варьируя напряжение на излучателе выбирали интенсивность ультразвука равной порогу возникновения звуколюминесценции или не намного выше порога. Ультразвук отключали, жидкость отстаивалась в течение 2-х часов без воздействия УЗ полем. Затем ультразвук включали в импульсном режиме и регистрировали выходной сигнал фотоумножителя.

Установлено, что время задержки появления свечения увеличивается при уменьшении *т* и увеличении *T*, т.е. при увеличении скважности импульсов. Использование режима работы с задержкой возникновения кавитации открывает новые возможности в исследовании механизмов воздействия мощного ультразвука биологические структуры и физико-химические процессы в жидкостях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № Т21М-027 и Правительства Пермского края Российской Федерации в рамках научного проекта № С-26/562 от 23 марта 2021 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Matula T.J., Roy R.A., Mourad P.D., McNamara W.B., Suslick K.S. Comparison of multibubble and single-bubble sonoluminescence spectra. // Phys Rev Lett . 1995. V. 75. № 13. P.:2602-2605.

2. Казачек М.В., Гордейчук Т.В. Применение корреляционного метода для определения количества вспыхивающих пузырьков и количества фотонов в вспышке при многопузырьковой сонолюминесценции. // Письма в ЖТФ, 2020. Т. 46, вып. 6. 2020. С. 11-15.

3. Okitsu K., Suzuki T., Takenaka N., Bandow H., Nishimura R., Maeda Y. Acoustic multibubble cavitation in water: A new aspect of the effect of a rare gas atmosphere on bubble temperature and its relevance to sonochemistry. // J. Phys. Chem. 2006. V. 110. P. 20081–20084.

4. Pflieger R., Lejeune M., Noel C., Belmonte T., Nikitenko S.I., Draye M. Diagnosing the plasma formed during acoustic cavitation in [BEPip][NTf2] ionic liquid. // PhysChemChemPhys 21. 2019. P. 1183–1189.

5. Flannigan D. J. and. Suslick K.S. Plasma formation and temperature measurement during single-bubble cavitation. // Nature London. 2005. V. 434. P. 52–55.

6. Saadah N., Yusof M., Anandan S., Sivashanmugam P., Flores E. M.M., Ashokkumar M. A correlation between cavitation bubble temperature, sonoluminescence and interfacial chemistry – A minireview. // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. V. 85. 2022, 105988.

7. Котухов А.В., Гаврилюк В.С., Минчук В.С. Дежкунов Н.В. Комбинированный метод исследования акустической кавитации. // Доклады БГУИР. Минск, 2020. - Т. 18, № 4. - С. 80-88.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ГАЛЬВАНОКОАГУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Муллакаев М.С., Муллакаев Р.М., Боднарь О.Б.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия, mullakaev@mail.ru

В подземных водах (ПВ) Урало-Сибирского региона наблюдаются превышения предельно допустимых концентраций по Mn, Fe, Si, которые и являются основными загрязняющими компонентами. Помимо этого, вода зачастую обладает повышенной коррозионной активностью и неудовлетворительными органолептическими показателями: цветность, мутность, запах и привкус. Для обеспечения населения данного региона качественной питьевой водой необходимо осуществление мероприятий по модернизации технологий водоподготовки, с учетом качественного состава подземных вод,

Обследование объекта. С целью модернизации технологии очистки подземных вод на ВОС-3200 ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Югорск» на основе ультразвукового гальванокоагуляционного (УЗГК) метода было проведено обследование этого объекта, изучены имеющаяся техническая документация и условия эксплуатации оборудования, проанализированы данные по качественному и количественному составу загрязнений подземных вод.

Подземная вода, подлежащая очистке, от водозабора, состоящего из семи скважин, работающих в периодическом режиме, насосами первого подъема подаётся на сооружения, где первоначально с целью обезжелезивания и деманганации поступает в смеситель, в который одновременно из воздухосборника подаётся воздух, нагнетаемый компрессором. Аэрированием из воды удаляется гидрокарбонат железа Fe(HCO₃)₂, образующийся Fe(OH)₂ кислородом окисляется до Fe(OH)₃. Кроме того аэрирование способствует удалению из воды углекислого газа (CO₂).

Затем вода последовательно подаётся на песчаные фильтры первой ступени и второй ступени с направлением потока сверху вниз. Фильтрующий материал – кварцевый песок. Диаметр зерна для фильтров первой ступени – 1,0-2,0 мм, для фильтров второй ступени – 0,6-1,2 мм. Производительность установки 53 м³/ч, давление на входе в фильтры 0,2 МПА, скорость фильтрации 1 и 2 ступени – 7-10 м³/ч.

Водо-воздушная промывка фильтров, осуществляется в 4 этапа:

1-этап: продувка воздухом с расходом 15-20 л/с м² – 2 мин;

2-этап: промывка водовоздушной смесью с расходом: воды – 3-5 л/с м², воздуха – 15-20 л/с м²) –5мин;

З-этап: промывка водой с расходом 6-8 л/с м² – 5мин;

4-этап: сброс первого фильтрата в дренаж – 40-60 мин.

Отфильтрованная вода собирается в накопительных резервуарах и насосами второго подъема подаётся для обеззараживания на бактерицидные установки и далее поступает потребителю. Производительность ВОС-3200 – 3200 м³/сут. Максимальный суточный расход воды – 1000 м³.

Проведённое обследование ВОС-3200 показало:

– имеющиеся таблицы наблюдений за химическим составом подземных вод и результаты ежедневных анализов показателей качества проб воды из коллекторов свидетельствуют о превышении в очищенной воде ПДК по марганцу и железу.

 отсутствуют сведения о содержании кремниевой кислоты, свободной углекислоты и сероводорода;

– недостатком проектного решения является неэффективность гравитационного метода отстаивания воды и получение осадка с высокой влажностью. Тестовые исследования показали, что продолжительность отстаивания превышает 6 суток, вместо проектных 6 часов.

Результаты экспериментов и их обсуждение. С целью модернизации технологии очистки подземных вод на ВОС-3200 ООО «Газпром трансгаз Югорск» на

основе УЗГК-метода были проведены тестовые эксперименты, по оценке его эффективности и целесообразности промышленного использования.

Эксперименты были проведены на пилотном УЗГК-стенде с использованием гальванопары железо-кокс (Fe–C) в промышленных условиях, непосредственно на территории промплощадки ВОС-3200.

В табл. 1 представлены данные, иллюстрирующие изменение химического состава очищенной воды (OB) в ходе эксперимента по сравнению с водой из подземных источников (исходной воды- –ИВ) после ввода 150 г магнетита на 1 л ИВ, поступающей на ВОС-3200 с концентрацией 15 % и последующего отстаивания в течение 80 мин.

Таблица 1. Показатели подземных вод до и после очистки с использованием магнетита (150 г/л), после УЗ-активации (20 мин)

Nº	Показатели, ед. измерения	Фотоколориметрический метод				ПДК (СанПиН 2.1.4-1074-	Данные ЛПУ (в течение года).	
п/п		ИВ	OB	ИВ	OB	01)	ИB	
		1 ce	рия	2 ce	рия		, ib	
1	рН	6,8	7,1	7	7,8	6-9	5,65-6,43	
2	Мутность, мг/л	22	0	20	2	1,5	0,94-1,4	
3	Цветность, град	195,0	7,5	160	0	20	9,16-14,7	
4	Железо (Fe) общ., мг/л	8,7	0,2	8,04	0,09	0,3	2,64-5,25	
5	Марганец (Mn ²⁺), мг/л	0,7	0	0,74	0,09	0,1	0,194-0,37	
6	Кремний (Si), мг/л	9,63	0,29	9,58	0,45	10		

Результаты очистки проб, отобранных спустя месяц с концентрацией магнетита в диапазоне 5...50 г/л даны в табл. 2. Режимные параметры УЗ- обработки ИВ следующие: удельная УЗ-мощность – 300 Вт/л; время обработки –30 с; режим – непрерывный.

Таблица 2. Концентрация загрязнений подземных вод до и после очистки с использованием УЗ-воздействия и различной концентрацией доз магнетита

	Наименовани е загрязнений	Концентрация загрязнений, мг/л					
№ п/п		ИВ	СанПиН 2.1.4-1074-01	Концентрация магнетита, г/л			
			5 г/л	10 г/л	50г/л		
1	Si	9,32	10	3,98	3,12	2,91	
2	Fe	1,30	0,3	0,12	< 0.1	< 0.1	
3	Mn ²⁺	0,347	0,1	0,263	0.208	0.146	

Результаты выполненных работ, свидетельствует о следующем:

 независимо от количества кислорода, введённого в очищаемую воду при аэрации, процессы обезжелезивания и деманганации в присутствии кремния протекают недостаточно эффективно;

 попытки интенсификации процессов окисления железа и марганца с помощью химических окислителей (перманганата калия, гипохлорита натрия, озона) не дают ощутимых результатов;

– в связи с тем, что кремний взаимодействует только с трёхвалентным (окислённым) железом, УЗГК-метод очистки вод представляется перспективным;

 заметное снижение содержания кремния за счёт гальванокоагуляции заметно повлияет на повышение эффективности традиционно применяемых на станциях обезжелезивания аэрирующих смесителей.

Разработка принципиальных решений. На основе результатов обследования системы водоснабжения ВОС-3200 и выполненных экспериментальных работ руководству предприятия предложено провести модернизация ВОС-3200 за счёт размещения автономного УЗГК-блока (рис. 1) предварительной очистки ПВ с размещением гальванокоагуляторов в зале фильтров и промежуточной реакционной

ёмкости в находящемся под ним подвальном помещении, а также использование двух резервуаров-отстойников и насосов имеющимся на ВОС-3200. Аппаратурнотехнологическая схема (рис. 2) предусматривает сорбционную очистку подземных вод.





Рисунок 1 – Автономный УЗГКблок очистки загрязненных вод: гальванокоагулятор КБ-1; УЗ-генератор (10 кВт), преобразователи ПМС 2-22, волноводно-излучающая система.



Магнетит, наработанный гальванокоагулятором 1 поступает в скрапоуловитель 2, а затем в УЗ-реактор 5, где происходит его диспергация. Время активации регулируется изменением скоростью движения суспензии магнетита насосами 15. Затем суспензия магнетита поступает в реактор приготовления сорбента 6, куда одновременно поступает гранулы основы сорбента из ёмкости 7. Приготовленный сорбент насосом подаётся реактор адсорбции 9, куда одновременно поступает загрязнённая вода. Вода после очистки, в реакторе 9 насосом 15 подаётся в отстойник 10, а затем на фильтры. Отработанный магнетит, после магнитного сепаратора, подаётся в реактор десорбции 12, где происходит десорбция ионов тяжелых металлов от сорбента за счёт комбинированной обработки химическими реагентами в УЗ-поле. Барботаж сжатым воздухом, создаваемый компрессором 13, обеспечивают интенсификацию процессов в ёмкости 3 и реакторе сорбции 9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mullakaev M.S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. M.: HELRI, 2018. 376 p.

2. 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. Issue 2. P. 812–818.

3. Муллакаев М.С. Ультразвук в процессах очистки сточных вод. – М.: НИИ ИЭП, 2020. – 308 с

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТІNІ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рубаник В.В.¹, Рубаник В.В. мл.¹, Багрец Д.А.¹, Лабецкий В.С.¹, Урбан В.И.¹, Андреев В.А.², Luong Van Duong³, Doan Dinh Phuong³

¹ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by ²ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», Москва, Россия

³Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam, duonglv@ims.vast.ac.vn

К настоящему времени установлено, что ультразвуковая обработка (УЗО) позволяет модифицировать структуру, естественно, изменяя и механические свойства обрабатываемого материала [1-5]. УЗО является единственным из динамических способов, который одновременно обеспечивает получение малой шероховатости поверхности, сильно упрочненного поверхностного слоя, относительно больших остаточных сжимающих микронапряжений и значительное повышение эксплуатационных показателей изделий (микротвердости, коррозионной стойкости и др.). В сочетании с другими способами, например, нанесением упрочняющих, защитных и др. покрытий, такая обработка позволяет варьировать свойства металлических материалов в весьма широких пределах.

Целью работы являлось улучшение функциональных и эксплуатационных характеристик TiNi сплавов за счет ионно-плазменного (осаждение TiN покрытия) и ультразвукового воздействия.

На основе расчета температурного режима TiNi подложки в процессе ионноплазменной обработки обоснован и реализован технологический режим нанесения покрытия TiN, включающий предварительный нагрев до температуры рекристаллизационного отжига 700 °C за счет бомбардировки ускоренными ионами Ti при U = -800 B, I = 100 A в течение 20 мин, нанесения подслоя титана при U = -100 B, I = 100 A в течение 2 мин, который обеспечивает повышенную адгезию TiN покрытия к основе, и собственно осаждение TiN при U = -100 B, I = 100 A, $P_{N2} = 4 \cdot 10^{-1}$ Па в течение 15 мин.

УЗО осуществляли с помощью разработанной авторами экспериментальной установки ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработки плоских заготовок [6].

Изучены параметры мартенситных превращений (МП) в сплаве TiNi после комбинированной обработки по схемам УЗО+TiN и TiN+УЗО с различным числом проходов *п*. Установлена преимущественно термическая природа изменений параметров МП в процессе осаждения TiN покрытия, которые заключаются в увеличении скрытой теплоты превращения вследствие релаксации напряжений, возникающих при поверхностном пластическом деформировании как при производстве заготовок (режим поставки), так и в процессе УЗО.

Исследована морфология поверхности и распределение элементов в поверхностном слое образцов TiNi после комбинированной обработки по схемам УЗО+TiN и TiN+УЗО. Выявлен характерный для вакуумно-дугового метода тип поверхностных дефектов – макрочастицы капельной фазы со средним размером от 1 до 5 мкм. Показано, что последующая УЗО способствует существенному снижению количества капельной фазы, однако с увеличением *n* на поверхности наблюдается нарушение сплошности TiN покрытия на отдельных участках. Это подтвердил количественный анализ содержания никеля: для схемы УЗО+TiN величина C_{Ni} варьировалась от 8,9 вес.% (n = 1) до 2,8 вес.% (n = 6), для схемы TiN+УЗО – составляла не менее 10,2 вес.%.

Исследовано влияние комбинированной обработки образцов TiNi на микротвердость по Кнупу. Выявлен синергетический эффект двух упрочняющих технологий (TiN+УЗO), который заключается в увеличении микротвердости TiNi (HK

160 в режиме поставки): за счет осаждения TiN – до HK 1090, за счет последующей УЗО – до HK 1450 (*n* = 1), HK 1830 (*n* = 3) и HK 1840 (*n* = 6).

С использованием методов измерения стационарного потенциала и сканирующего вибрирующего зонда изучены коррозионные свойства сплава TiNi после комбинированной обработки. Установлено, что для схемы УЗО+TiN величина E_{ct} практически не зависела от числа проходов *n*, составляла порядка -250 мВ и определялась величиной потенциала TiN покрытия. Для схемы TiN+УЗО выявлено, что с увеличением числа проходов величина E_{ct} смещалась в сторону более отрицательных значений, приближаясь к значению стационарного потенциала образца TiNi в состоянии поставки (-350 мВ). Высокая электрохимическая совместимость материалов основы и покрытия в хлоридной среде с минимальными флуктуациями плотности тока была выявлена для образцов, подвергнутых обработке УЗО+TiN и TiN+УЗО (*n* = 1).

На основании полученных экспериментальных данных предложен технологический процесс обработки сплава TiNi по схеме TiN+УЗО, включающий:

- нанесение методом вакуумно-дугового осаждения покрытия TiN толщиной ~ 1 мкм при токе дуги 100 А, потенциале смещения от -800 В (режим отжига при ~ 700 °C) до -100 В (нанесение подслоя Ti и осаждение TiN) и давлении азота ~ 0,4 Па;

- ультразвуковую обработку с частотой колебаний ~ 19,5 кГц, амплитудой смещений ~ 15 мкм и числом проходов инструмента *n* = 1.

Такая обработка позволяет достичь синергетического эффекта упрочнения поверхностного слоя TiNi сплава в сочетании с высокими коррозионными свойствами и улучшенной морфологией поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T21B-004) и Vietnam Academy of Science and Technology (project code QTBY01.02/21-22).

Литература:

1. Артемьев, В.В., Клубович, В.В., Рубаник, В.В. Ультразвук и обработка материалов. Мн.: Эко-перспектива, 2003. – 335 с.

2. Effect of ultrasonic treatment on the microstructure and properties of nanostructured nickel processed by high pressure torsion / A. Nazarova, R. Mulyukov, Yu. Tsarenko [et al.] // Materials Science Forum. – 2011. – Vol. 667-669. – P. 605-609.

3. Дефекты структуры и мезорельеф поверхности никелида титана после интенсивной пластической деформации ультразвуковым методом / А.И. Лотков, А.А. Батурин, В.Н. Гришков, П.В. Кузнецов, В.А. Клименов, В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 2005. – 8-й Спец. Выпуск. – С.109-112.

4. Сбитнев, А.Г. Повышение износостойкости деталей из титановых сплавов на основе комбинированного применения полиионной имплантации и ультразвукового воздействия: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / А.Г. Сбитнев. – Москва, 2020. – 168 с.

5. Ковалевская, Ж.Г. Структура и свойства поверхностных слоев и покрытий при модифицирующей ультразвуковой обработке: дисс. ... докт. техн. наук: 05.16.09 / Ж.Г. Ковалевская. – Томск, 2018. – 334 с.

6. Оборудование для ультразвуковой поверхностной обработки титановых сплавов / В.В. Рубаник [и др.] // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции (Витебск, 23-27 мая 2022 года). – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 394-395.

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИЛУМИНОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЕССОВАНИЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ

Рубаник В.В.¹, Шепелевич В.Г.², Гусакова О.В.³, Гусакова С.В.² ¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь ²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь ³Международный государственный экологический институт им. А.Д.Сахарова БГУ, Минск, Беларусь e-mail Huskova@bsu.by

Легкие сплавы алюминия с кремнием (силумины) обладают хорошими эксплуатационными характеристиками: высоким пределом прочности, низким коэффициентом температурного расширения, высокой коррозионной стойкостью, что обеспечивает интерес к ним разработчиков и потребителей. Свойства силуминов улучшаются с повышением концентрации кремния, однако зависят от формы образуемых им частиц. При образовании крупных пластин кремния материал Потому становиться хрупким. основной задачей разработчиков технологий производства силуминов является изменение формы частиц кремния от пластинчатой к гранулированной или разветвленной и уменьшение их размера, что обеспечивается модифицирующими добавками и увеличением скорости затвердевания [1,2].

Целью настоящей работы является исследование микроструктуры и свойств исходного силумина около эвтектического состава с наноразмерными частицами кремния, полученного методом сверхбыстрой закалки из расплава, используемого в качестве сырья для получения полуфабриката в виде порошка и изготовления из него прессованных под воздействием ультразвука образцов.

В работе представлены результаты исследования микроструктуры и свойств сплава Al-12,2 мас.% Si – 0,8 мас.% Mg – 0,3 мас.% Mn – 0,6 мас.% Fe – 0,6 мас.% Ni – 1,5 мас.% Cu (AlSi-M). Для получения исходного сплава использовали метод сверхбыстрой закалки их расплава, при котором расплав выплескивался на внутреннюю полированную поверхность вращающегося барабана-кристаллизатора, растекался тонким слоем и затвердевал в виде фольги. Толщина фольги находилась в пределах 60-150 мкм. Средняя скорость охлаждения расплава составляла 10⁵ К·с⁻¹. Фольга измельчалась на планарной шаровой мельнице RETSCH PM 100 при сухом помоле со скорость 1300 об/мин. Для получения прессованных образцов использовался 4-х тонный ручной пресс с усилием 1,95 10⁴ Н. Прессование осуществлялось без обработки ультразвуком, с предварительной обработкой и при непосредственном воздействии ультразвука с частотой ~20 кГц. Микроструктура, элементный и фазовый составы фольги, порошка и прессованных образцов CЭM, исследовалась С помощью рентгеноспектрального микроанализа, рентгеноструктурного анализа. Зеренная структура фольги изучалась методом ДОЭ. Были определены значения микротвердости и коэффициента трения исследованного сплава.

Изображения микроструктуры в поперечном сечении фольги приведены на рисунке 1. Установлено, что фольга сплава AISi–M имеет слоистую микроструктуру, формирование которой обусловлено изменением термодинамических условий на границе раздела фаз твердое тело-расплав. Показано, что микроструктура слоя фольги *A*, прилегающего к кристаллизатору (толщиной 10-20 мкм), формируется в наиболее неравновесных условиях: при глубоком переохлаждении расплава и высоком коэффициенте теплопередачи. Предложен механизм формирования микроструктуры слоя *A*, заключающийся в безразделительной кристаллизации пересыщенного твердого раствора α-AI со средним размером зерна 4,3 мкм. Однородное распределение наноразмерных рентгеноаморфных частиц формируется в результате распада твердого раствора. Основной объем фольги имеет дендритную микроструктуру, состоящую из дендритов первичного алюминия (темные участки на рис. 1б), по границам которых локализуются металлосодержащие включения. Сетки алюминия и наноразмерных пластин эвтектического кремния заполняют междендритное пространство, как показано на рисунке 1б и в. Для выявления тонкой структуры было проведено травление поверхности, направленное на удаление алюминия. Обнаружено, что наноразмерные частицы металлов локализуются не только на границах дендритов, но и в объеме частиц кремния, ограничивая их рост. В результате наноразмерные пластины кремния разбиваются на отдельные участки.



Рисунок 1 – Микроструктура фольги сплава AISi-M при различных увеличениях: а – общий вид в поперечном сечении, б и в – дендритная структура

Рентгеноспектральный микроанализ показал, что элементный состав слоев фольги одинаков и соответствует концентрации элементов в исходном сплаве, что свидетельствует об отсутствии ликвации при затвердевании. Это обеспечивает постоянство состава порошка (таблица 1).

Номер	Концентрация элементов, мас. %						
спектра	AI	Si	Mg	Mn	Fe	Ni	Cu
1	81,7	13,2	0,8	0,4	0,9	1,0	2,0
2	82,5	12,0	0,8	0,4	0,9	1,1	2,2
3	81,4	12,8	0,7	0,5	1,2	1,3	2,0
4	81,7	12,5	0,8	0,3	1,4	1,1	2,2
5	82,0	12,7	0,8	0,5	1,3	1,0	1,8
6	82,5	11,8	0,7	0,7	0,9	0,9	2,3

Таблица 1 – Концентрация элементов в частицах порошка

Высокая пластичность силуминов приводит к вытянутой форме частиц порошка, при этом дисперсность фазы Si сохраняется (рисунок 2).



Рисунок 2 – Микроструктура порошка и распределение кремния в частицах

Обнаружено, что предварительная ультразвуковая обработка порошка с частотой ~20 кГц в течение 60 минут обеспечивает однородное распределение частиц порошка в объеме изделия в отличие от образцов, не подвергнутых обработке. Наблюдается эффективная деагломерация областей с наноразмерными частицами и гомогенизация образцов (рисунок 3). Прессование под воздействием ультразвука улучшает микроструктуру прессованных образцов, обеспечивая упорядоченное 158 расположение вытянутых частиц порошка, заполнение пространства между крупными частицами порошком мелкой фракции, что приводит к снижению пористости на 5-10 %.



Рисунок 3 – Микроструктура прессованных образцов: а – без воздействия ультразвука, б – при предварительной обработке ультразвуком, в – прессование с наложением ультразвуковых колебаний

Выявлено постоянство элементного состава по объему прессованных изделий. Рентгеноструктурный анализ показал, что на основе легирующих элементов образуются интерметаллические соединения Al₃(CuNi)₂, Mg₅Si₆, Al₁₇(FeMn)Si₂.

На рисунке 4 представлены результаты исследования микроствердости фольги сплава AlSi-M. Для сравнения приведены значения микротвердости массивного образца этого сплава, полученного при скорости охлаждения расплава 10² К/с, а также микротвердость массивного образца и фольги нелегированного сплава AK12оч (Al-12,5 мас.% Si-0,2 мас.% Fe).



Рисунок 4 – Микротвердость сплавов АК12оч (1 - массив, 4 – фольга) и AlSi-M (2 - массив, 3 - прессованный, 5 – фольга)

ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович, Е.И. Проблема модифицирования алюминиево-кремниевой эвтектики силуминов. пути решения / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2018. – №2 (91). – С.12-15.

2. Gusakova, O. Formation of the microstructure of rapidly solidied hypoeutectic Al-Si alloy / Olga Gusakova, Vasiliy Shepelevich, Dmitri V. Alexandrov and Ilya O. Starodumov //Eur. Phys. J. Special Topics. – 2020. – V. 229. – P. 417-425.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ [Mg/Fe-NO₃⁻] ПО ОТНОШЕНИЮ К ХРОМАТ-ИОНАМ CrO₄²⁻

Голубев Р.А.¹, Критченков А.С.^{1,2}, Критченков И.С.^{1,3}, Рубаник В.В.¹, Рубаник В.В. мл.¹, Шилин А.Д.¹

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь ita@vitebsk.by

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия ³Санкт-Петербургский государственный университет, г.Санкт-Петербург,Россия

Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) представляют собой класс веществ, состоящих из положительно заряженных слоёв, образованных ионами металлов и гидроксид-ионами, разделенных подвижными анионами и молекулами воды в межслоевом пространстве. СДГ являются перспективным классом неорганических соединений и находят широкое применение при катализе органических реакций, очистке сточных вод, сорбционных и ионообменных процессах, адресной доставке лекарственных средств и др. [1, 2].

В рамках данной работы были оптимизированы методики ультразвукового синтеза указанных СДГ. Показано, что воздействие ультразвуковое воздействие с частотой 22 кГц в кавитационном режиме при избыточном гидростатическом давлении 2 атм приводит к образованию СДГ в нитратной форме, характеризующихся высокой степенью кристалличности (Рисунок 1). Кроме того, обработка реакционной смеси ультразвуком при повышенном гидростатическом давлении позволила значительно сократить время образования СДГ с 24 часов до 30 минут, что согласуется с результатами [3].





Полученные СДГ характеризуются выраженной слоистостью, что подтверждается данными рентгенодифракционного анализа (Рисунок 1), а также данными сканирующей электронной микроскопии (Рисунок 2).

Синтезированные Mg/Fe-NO₃⁻ СДГ являются высокоэффективными сорбентами хромат-ионов, содержащихся в водном растворе. Сорбционное равновесие наступает в течение 5–10 минут. Кинетика сорбции подчиняется уравнению Фрейндлиха (1):

$$lgq_e = lgK_F + \frac{1}{n}lgC_e$$
(1)

где q_e – масса адсорбированного хромата калия на единицу массы адсорбента СДГ (мг/г), К_F – константа Фрейндлиха (мг/г), 1/n – интенсивность адсорбции.

Исходя из экспериментальных данных были рассчитаны параметры $K_F = 1.01$ и 1/n = 0.656, а также коэффициент разделения 0.0076, указывающий на преобладание сорбционного процесса. Коэффициент корреляции $r^2 = 0.99927$.



Рисунок 2 – СЭМ-изображение Mg/Fe-NO₃⁻ СДГ.

Таким образом, разработанные методики ультразвукового синтеза позволяют получить высокоэффективные сорбенты на основе слоистых двойных гидроксидов [Mg/Fe-NO₃⁻], которые интересны с практической точки зрения в устройствах очистки от хромат-ионов CrO₄²⁻, являющихся высокоопасными экологическими поллютантами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jijoe, P.S. Fundamentals, synthesis, characterization and environmental applications of layered double hydroxides: a review / P.S. Jijoe, S.R. Yashas, H.P. Shivaraju // Environmental Chemistry Letters. - 2021. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01200-3/

2. Santos, G.E.D. Layered double hydroxides/biochar composites as adsorbents for water remediation applications: recent trends and perspectives / G.E.D. dos Santos [et al.] // Journal of Cleaner Production. - 2021. - V.284. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124755

3. Salak, A.N. High-Power Ultrasonic Synthesis and MagneticField-Assisted Arrangement of Nanosized Crystallites of Cobalt-Containing Layered Double Hydroxides / Salak, A.N. [et al.] // ChemEngineering. – 2019. – Vol.3, 62; doi:10.3390/chemengineering3030062

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОРИСТОМ СПЛАВЕ Ni-Ti, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ СВС ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ШИХТЫ

Рубаник В.В. мл.¹, Рубаник В.В.¹, Ломач М.С.¹, Рубаник О.Е.², Шилин А.Д.¹, Maashaa D.³, Agvaantseren T.³

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita @vitebsk.by ²Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь ³Mongolian University of Life Science, Ulaanbaatar, Mongolia, Dovchinvanchig@muls.edu.mn

Пористые сплавы никелида титана, обладающие эффектом памяти формы или сверхупругости, являются перспективными материалами, как для медицины, так и технических применений. Эти материалы получают методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), являющегося сегодня одним из самых дешевых и простых. Структуру и свойства таких пористых материалов можно изменить за счет ультразвукового воздействия, как на исходный порошковый материал, так и на процесс синтеза. Предварительная ультразвуковая активация (УА) смеси порошков никеля и титана способствует образованию более изотропной пористой структуры В процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и делает состав фазы NiTi более однородным. Поскольку высокотемпературный синтез занимает непродолжительное время, процесс структурообразования в сплаве протекает не в полной мере, необходимо проводить дополнительный отжиг материала. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния термообработки на мартенситные превращения в пористом сплаве Ni-Ti, полученном методом CBC после ультразвуковой активации исходных порошков.

В качестве исходных порошков использовали порошки титана и никеля. Смесь готовили в соотношении Ti–50.0at.%Ni с общей массой навески 50 г. Порошки, соединенные в данной пропорции, перемешивали в течение 8 часов в V-образном смесителе с постоянной частотой вращения. Далее смесь порошков массой 50 г подвергали ультразвуковой активации с частотой 22 кГц, используя ультразвуковой генератор УЗГ2-1М. Обработка производилась в течении разного времени: от 15 до 120 минут. Варьировали также амплитуду ультразвуковых колебаний. После этого, смесь порошков засыпали в кварцевый стакан диаметром 30 мм и высотой 30 мм, устанавливали в реактор, прокачивали внутренний объем аргоном и включали печь нагрева. При достижении температуры 350°С выдерживали образец в течение 1 часа и инициировали реакцию СВС. После этого из центральной части вырезали образцы для последующей термообработки и калориметрических исследований.

Изохронный отжиг проводили в муфельной печи в интервале температур от 300 до 600°С с шагом 100°С и выдержкой при каждой температуре 30 минут. После каждого отжига исследовали кинетику мартенситных переходов методом измерения теплового потока при охлаждении и нагреве на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 214 Polyma компании NETZSCH. Скорость охлаждения и нагрева составляла 10°С/мин, температурный интервал исследований – от -60°С до 140°С.

На рисунке 1 представлены калориметрические кривые, полученные при охлаждении (а) и нагреве (б) образцов пористого никелида титана, полученного методом CBC, после изохронного отжига. Во всех полученных CBC пористых образцах наблюдается несколько калориметрических пиков при охлаждении и при нагреве. Высокотемпературные пики A и E соответствуют превращению B2→B19' реализуемому в областях с содержанием никеля близком к 50,0%, а пики B и D тому же превращению, протекающему в объемах с повышенной концентрацией никеля.

Отжиг приводит к изменению температур фазовых переходов, а также к изменению количества пиков выделения тепла. Отжига при температурах 400 и 500°С

приводит к появлению пика C, обусловленному фазовым превращением из кубической фазы B2 в промежуточную ромбоэдрическую фазу R. При этом низкотемпературный фазовый переход в областях с повышенной концентрацией никеля протекает по схеме B2—R—B19'.



Рисунок 1 – Калориметрические кривые, полученные при охлаждении (а) и нагреве (б) сплава NiTi, полученного методом CBC после УА в течение 60 мин с амплитудой колебаний 25 мкм, после каждого этапа изохронного отжига

Отжиг при температуре 500°С приводит для всех образцов к появлению при нагревании высокоинтенсивного пика F, что, видимо, связано с частичным растворением частиц вторичной фазы Ti₃Ni₄ и диффузионным перераспределением Ni

в TiNi. Это способствует увеличению объемной доли фазы TiNi, претерпевающей мартенситные превращения.

Регистрация двух пиков тепловыделения при охлаждении и двух пиков теплопоглощения при нагреве после отжига пористых образцов при 600°С приводит к полному растворению частиц вторичной фазы Ti₃Ni₄ в TiNi и реализации фазовых превращений по схеме B2↔B19' без образования промежуточной R фазы.

Таким образом, для всех полученных СВС пористых образцах до отжига наблюдаются два калориметрических пика при охлаждении и два пика при нагревании. Изохронный отжиг в интервале температур 300-600°С приводит к изменению параметров мартенситных превращений полученных методом СВС пористых образцов никелида титана:

- количество пиков тепловыделения после отжига при 300, 400, 500°С увеличивается до трех, что обусловленному фазовым превращением из кубической фазы В2 в промежуточную ромбоэдрическую фазу R;

- смещению пиков B, C, D, и F и изменению их интенсивности, что связывается с изменением в процессе термообработки доли вторичной фазы Ti₃Ni₄;

- изменению характеристических температур мартенситных переходов, как следствие предыдущего пункта.

При этом следует отметить, что характеристические температуры мартенситных переходов для калориметрических пиков А и Е практически не изменяются.

Работа выполнена в рамках совместного гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Монгольского фонда науки и технологии (T21Mн-004, ShuKhtB-2021/02).

УСТАНОВКА ДЛЯ СИНТЕЗА ГРАФЕНА МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Рубаник В.В.¹, Рубаник В.В. мл.¹, Луцко В.Ф.¹, Дедюро В.В.¹, Савицкий В.О.¹, Никифорова И.В.¹, Bui Hung Thang², Doan Dinh Phuong²

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь ita@vitebsk.by ²Институт материаловедения ВАНТ, г. Ханой, Вьетнам

В настоящее время графен рассматривается как перспективный материал для электроники, медицины, автомобилестроения и др. Существует достаточно много получения графеновых частиц, среди которых можно способов выделить микромеханическое расслаивание графита, расслаивание графита с использованием химических методов И расслаивание графита в жидкой фазе [1-3]. Высококачественные графеновые листы часто получают методом отслаивания от графита в жидкой фазе [4, 5]. Известно, что наиболее эффективно разрушение агрегатов наночастиц происходит в жидких средах под действием ультразвуковых колебаний (ультразвуковое диспергирование наночастиц). Ультразвуковая обработка позволяет получать высокодисперсные (средний размер частиц микроны и доли микрон), однородные и химически чистые суспензии [6]. В тоже время существующие способы получения графена путем ультразвукового диспергирования суспензии графита в воде или органических растворителях недостаточно эффективны, имеют низкую производительность и не могут использоваться в промышленных масштабах.

Повысить производительность процесса получения графена из графита можно высокоамплитудной (50 ≥ мкм) ультразвуковой обработкой суспензии графита проточным методом под избыточным давлением [7,8]. Ультразвуковая обработка суспензии в высокоамплитудном режиме кавитации позволит существенно интенсифицировать процесс диспергирования графита по плоскостям спайности за счет дополнительного воздействия энергии схлопывания пузырьков. В этом случае импульс энергии будет передаваться от жидкости частицам графита за более короткое время, но с заметно большей силой, что способствует ускорению разрушения частиц графита. Обработка суспензии пол избыточным гидродинамическом давлении приведет к повышению порога кавитации, что позволяет существенно повысить производительность процесса [9].

Использовать преимущества высокоамплитудной обработки суспензии графита проточным методом под избыточным давлением позволяет созданная в ИТА НАН Беларуси экспериментальная установка (рис.1) для синтеза графена жидкофазным расслоением графита методом ультразвукового диспергирования [7-9].

Работа установки осуществляется следующим образом.

Включают ультразвуковой генератор (не показан), который подает электрические сигналы частотой 20 кГц с регулируемой мощностью от 800 до 1200 Вт к ультразвуковому преобразователю 1, который преобразует электрическую энергию в механическую той же частоты. Посредством бустера 2 и излучателя 3 ультразвуковые колебания передаются на находящуюся внутри реактора 4 обрабатываемую суспензию 5. Непрерывная подача суспензии под давлением в зону обработки осуществляется забором из смесителя 6 графитной суспензии насосом 7. С помощью дросселя 9 регулируется скорость подачи суспензии. Количество суспензии поданной в 30HV обработки фиксируется расходомером 10. Контроль температуры обрабатываемой суспензии осуществляется с помощью термодатчика 11. Цикл обработки состоит из нескольких прокачек обрабатываемой суспензии через реактор 4. После чего обработанная суспензия поступает в сливной бак 8. Заливка новой порции суспензии производится через заливную горловину 12.



1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – бустер, 3- волновод излучатель,
4– реактор, 5 – обрабатываемая суспензия, 6 – смеситель, 7 – насос, 8 – сливной бак, 9 – дроссель, 10 – расходомер, 11 – термодатчик ЦР8002 с ТМС, 12 – заливная горловина

Рисунок 1 – Блок - схема установки для синтеза графена методом ультразвукового диспергирования под избыточным давлением

Установки для синтеза графена методом ультразвукового диспергирования под избыточным гидродинамическим давлением позволяет вести высокоамплитудную ультразвуковую обработку жидких сред в достаточно малом объеме жидкой среды, что вовлекает в процесс не только кавитационное воздействие, но и виброударное воздействие излучателя на частицы графита, вызывающее их механическое истирание и дробление. В результате значительно повышается эффективность процесса диспергирования, что позволяет обрабатывать до 5 раз больше графитного материала за единицу времени по сравнению с обработкой низкой амплитудой ≤ 50 мкм в обычных условиях. Наряду с этим, установка позволяет производить диспергирование и ультразвуковую механоактивацию порошковых материалов, обладающих высокой прочностью, в том числе, синтетических алмазов, керамических материалов, что расширяет номенклатуру обрабатываемых материалов.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект № Т21ВТНГ-004).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. K.S. Novoselov, V.I. Fal'ko, L. Colombo et al. A roadmap for graphene. Nature.-2012. – Vol. 490 – N. 7419 – P.192–200.

2. C. Soldano, A. Mahmood, E. Dujardin. Production, properties and potential of graphene. Carbon. – 2010. – Vol. 48 – N. 8 – P.2127–2150.

3. Shengkai Yang, Kelei Zhuo, Dong Sun, Xiaohui Wang, Jianji Wang. Preparation of graphene by exfoliating graphite in aqueous fulvic acid solution and its application in corrosion protection of aluminum. Journal of Colloid and Interface Science. – 2019. – Vol. 543 – P. 263-272.

4. M. Lotya, Y. Hernandez, P. J. King et al. Liquid phase production of graphene by exfoliation of graphite in surfactant/water solutions. Journal of the American Chemical Society. -2009. - Vol. 131 - N. 10 - P.361-362.

5. U. Khan, A. O'Neill, M. Lotya et al. High-concentration solvent exfoliation of grapheme. Small. – 2010. – Vol. 6 – N. 7 – P.864–871.

6. Muthoosamy K., Manickam S. State of the art and recent advances in the ultrasound-assisted synthesis, exfoliation and functionalization of graphene derivatives //Ultrasonics Sonochemistry. 2017 Vol. 39 P. 478–493.

7. Патент на полезную модель №7602 «Установка для ультразвукового диспергирования порошковых материалов» опубл. 2011.03.25. // Луцко В.Ф., Мозжаров С. Е., Шрубиков С.Н.

8. Патент на изобретение № 24013 «Способ получения графена»// Рубаник В.В., Луцко В.Ф., Савицкий В.О., Рубаник В.В.мл., Сенько С.Ф., Салак А.Н., Нгуен Вьет Дунг, Буй Хунг Танг, Доан Динь Фуонг.

9. Патент на полезную модель №7179 «Устройство для диспергирования и гомогенизации» опубл. 2011.04.30//Свиридёнок А.И., Игнатовский М.И., Кравцевич А.В., Бородуля В.А., Рубаник В.В., Махановская О. Н., Багрец Д.А.

СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И НАСТРОЙКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Луцко В.Ф.¹, Рубаник В.В.¹, Мозжаров С.Е.¹, Волк В.В.², Степаненко С.А.², Казьмин А.А.³

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita @vitebsk.by ² ООО «Стекло – сервис», г. Клинцы, Брянская обл., Россия

³Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

Ультразвуковое оборудование широко используется в разных облостях науки, техники и промышленности для сварки, пайки, механической обработки и др. Наиболее важным узлом ультразвукового оборудования является акустическая система, благодаря которой обеспечиваются такие параметры, как плотность акустической энергии, амплитуда, частота и тип колебаний. Типичная акустическая система состоит из последовательно соединенных пьезоэлектрического или магнитострикционного преобразователя 1, бустера 2 и волновода-излучателя 3 (рис.1). Пьезоэлектрический преобразователь превращает электроэнергию, полученную от электронного генератора (на рисунке не показан), в механическую энергию ультразвуковых колебаний. Бустер усиливает передаваемую на волновод-излучатель амплитуду механических смещений. Волновод-излучатель осуществляет передачу энергии ультразвуковых колебаний непосредственно в зону обработки.



1- пьезоэлектрический преобразователь, 2- бустер, 3 - излучатель

Рисунок 1 – Акустическая система

Для эффективной работы ультразвукового оборудования необходимо, чтобы все звенья акустической системы были согласованы по геометрическим размерам, т.е. соответствовали резонансной частоте. Кроме того, при эксплуатации оборудования неисправность одного из элементов акустической системы обычно приводит к повреждению других частей системы. Своевременное обнаружение любой неисправности в системе очень важно, чтобы избежать поломки очень дорогого оборудования. Для оценки состояния акустической системы, согласование всех ее звеньев при изготовлении нового оборудования в ИТА НАН Беларуси разработан стенд, который позволяет производить диагностику ультразвукового оборудования путем измерения импеданс-частотных характеристик, как всей акустической системы, так и отдельных ее элементов (рис.2) [1].



1 – цифровой мультиметр, 2 – универсальный генератор сигналов, 3 – магазин сопротивления измерительный, 4 – коммутационная плата, 5 – пьезоэлектрический преобразователь

Стенд также позволяет в процессе разработки и изготовления акустической системы и ее элементов производить проверку их импеданс-частотных характеристик на соответствие с требованиями конкретной ультразвуковой технологии. Измеряемые с помощью стенда, параметры характеристик, такие как резонансная и антирезонансная частоты, абсолютное значение импеданса на резонансной частоте, отсутствие паразитных резонансов, являются одними из основных факторов при оценке качества акустической системы и ее элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. IRE Standards on Piezoelectric Crystals, 1961", Proc.IRE, pp. 1162 - 1169; July, 1961.

СТРУКТУРА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А7 ПОСЛЕ РКУП С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рубаник В.В.¹, Гусакова С.В.², Рубаник В.В. мл.¹, Ломач М.С.¹, Луцко В.Ф.¹, Дородейко В.Г.³, Wenjing W.⁴, Yaohua Y.⁴

¹Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь ³ЗАО «Медицинское предприятие Симург», Витебск, Беларусь ⁴Пекинский университет науки и техники, Пекин, КНР

Работы, связанные с равноканальным угловым прессованием (РКУП) металлических материалов, вызывают значительный интерес у исследователей в области материаловедения. РКУП позволяет существенно изменить структуру металлов и сплавов до мелкозернистого или ультрамелкозернистого состояния и обеспечить тем самым достижение уникального комплекса физико-механических свойств [1,2]. При этом снижение усилия прессования является одной из актуальных задач процесса РКУП. Для снижения деформационных усилий разрабатываются различные устройства и приемы [3-5].

Ранее нами были проведены исследования по влиянию ультразвуковых колебаний (УЗК) на силовые характеристики РКУП цинка. Эти исследования показали, что наложение УЗК в процессе РКУП приводит к снижению усилия прессования в 1,5-2 раза и увеличению прочности материала. При этом, даже после одного прохода микроструктура материала, полученная прессованием с наложением УЗК, отличается от микроструктуры образцов полученных без УЗК. Наблюдается уменьшение размера зерен и изменение их кристаллографической ориентировки [4].

В данной работе приведены результаты исследования по влиянию УЗК на РКУП алюминиевого сплава А7. Для более эффективного использования УЗК при РКУП разработано устройство, позволяющее возбуждать колебания непосредственно в матрице. Установлено, что наложение УЗК при РКУП алюминиевого сплава позволило в 1,5–2 раза снизить усилие прессования. Происходит увеличение предела текучести, предела прочности и твердости. Наложение УЗК колебаний в процессе РКУП приводит к изменению, как размеров, так и формы зерен (рисунок 1).



Рисунок 1 – Зеренная структура алюминия : а – исходный; б,г – после одного и двух проходов без УЗК; в,д – после одного и двух проходов с УЗК

Распределение зерен по размерам становится более однородным, а структура зерен более равноосной. Наблюдается также изменение кристаллографической ориентировки зерен.

Таким образом, применение УЗК при РКУП является оправданным и может явиться новым научным направлением в обработке металлов давлением методами ИПД.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Т22КИТГ-011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, Progress in Materials Science 45 (2000) 103–189.

2. T.G. Langdon, Twenty-five years of ultrafine-grained materials: achieving exceptional properties through grain refinement, Acta Materialia 61 (2013) 7035–7059.

3. Валиев, Р.З., Объёмные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. - М. : Академкн., 2007. - 397 с.

4. Рубаник, В.В., Ультразвуковое наноструктурирование металлических материалов /В.В. Рубаник, В.Ф.Луцко, В.В. Рубаник (мл.), М.С. Ломач, В.Г. Дородейко // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов /– Москва: Изд-во НИТУ «МИСиС», 2022. – С. 149.

5. Bagherzadeha.S, Analysis of plastic deformation behavior of ultrafine-grained aluminum processed by the newly developed ultrasonic vibration enhanced ECAP: Simulation and experiments / S. Bagherzadeha, K.Abriniab ,Q. Han // Journal of Manufacturing Processes Volume 50, February 2020–P. 485-497.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Дородейко В.Г.

ЗАО «Медицинское предприятие Симург», Витебск, Беларусь

Установка «TABP» предназначена для сборки трубки с ползуном системы введения медицинского изделия «Средство внутриматочное противозачаточное Юнона Био-Т» (модификаций «JUNO T AU», «JUNO T AG», «JUNO GOLD») методом ультразвуковой сварки в размер.

Установка «ТАВР» (рисунок 1) состоит из основания 1, установленного на регулируемых опорах 2. На основании закреплена опорная плита 3 с колонной 4, по которой с помощью рычага подачи 5 перемещается держатель 6 с установленным в нем сварочным ультразвуковым инструментом 7. Рядом с опорной плитой закреплен электронный блок управления, который закрыт защитным корпусом 8. Спереди корпуса расположены две сигнальные лампы: красная «Сеть» 9 и зеленая «Работа» 10. Сзади корпуса расположен переключатель 11, необходимый для включениявыключения установки. Перед защитным корпусом на основании установлена кнопка «Пуск» 12, с помощью которой запускается процесс сварки.



Рисунок 1 – Схема и общий вид установки для сборки трубки с ползуном «Тавр»

На опорной плите (рис.1) 3 располагается базирующее приспособление 13, состоящее (рисунок 2) из стола 1, оправки 2 и прижимного механизма 3. Справа от опорной плиты на основании расположены базирующая вилка 14 и базирующий упор 15.



Рисунок 2 – Базирующее приспособление

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Рубаник В.В.¹, Луцко В.Ф.¹, Критченков А.С.¹, Дедюро В.В.¹, Нарушко Е.О.² ¹Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск, Беларусь; ²ОАО «Пеленг», Минск, Беларусь

Изготовление оптических деталей на предприятии ОАО «Пеленг» (г. Минск, Республика Беларусь) из бесцветного (ГОСТ 3514-94) и цветного (ГОСТ 9411-91) оптического стекла предполагает осуществление процесса полирования, перед которым производится покрытие оптических деталей защитными лаками, наклеечными смолами и восками. Естественно, после полирования оптических деталей возникает необходимость удаления указанных защитных покрытий с промывочных жидкостей, которые должны быстро и надёжно удалять с поверхности оптических деталей загрязнения, а также эффективно растворять защитные лаки, смолы и воски.

В настоящее время для удаления защитных покрытий ОАО «Пеленг» использует промывку оптических деталей согласно Технологической инструкции ТИ 25 200.00133 от 02.11.2021 ацетоном, нефрасом и спиртом этиловым. Несмотря на высокую эффективность упомянутых промывочных жидкостей в процессе очистки, их использование является нежелательными из-за их наркотического действия и пожароопаности (ацетон, нефрас и спирт этиловый относятся к категории ЛВЖ). Таким образом, разработка новых высокоэффективных подходов к пожаробезопасному удалению защитных покрытий с оптических деталей является актуальной прикладной задачей.

Защитные лаки, смолы и воски представляют собой многокомпонентные смеси, в состав которых входят сложные эфиры, в том числе и макромолекулярной природы. Так, например, в состав эмалей входит макромолекулярный эфир нитроцеллюлоза, в состав восков – сложные эфиры цетилового, октадецилового, эйкозилового, церилового спиртов со стеариновой, карнаубовой или церотиновой кислотами, в состав смол – сложные эфиры резенов и резинолов с феруловой кислотой. Гидролиз сложных эфиров неизбежно приведёт к деструкции структуры покрытия, что значительно облегчит его удаление с поверхности оптического изделия. Гидролитическое расщепление сложноэфирной связи, протекающее по механизму нуклеофильного замещения, эффективно промотируется щелочами, в частности гидроксидом натрия. В результате образуются значительно более гидрофильные исходные спирты и соли соответствующих карбоновых кислот. В случае щелочного гидролиза производных целлюлозы происходит не только разрыв сложноэфирных выраженная деполимеризация в следствие гидролитического связей, но и расщепления гликозидных связей между образующими полимерную цепь звеньями Dглюкопиранозы.

В связи с тем, что бесцветное и цветное оптическое стекло имеет высокие показатели щёлочестойкости и пятнаемости, было решено провести попытку удаления защитного слоя с оптических деталей с использованием 2–10% водного раствора гидроксида натрия в качестве промывочной жидкости. Для эксперимента использовали оптические детали, покрытые защитной нитроэмалью HЦ-25, представляющей раствор нитроцеллюлозы, смолы и красящих пигментов в органических растворителях. Было выявлено, что при комнатной температуре время очистки оптических деталей от защитного лакокрасочного покрытия составляет от 8 до 15 часов в зависимости от толщины и степени остекловывания защитного покрытия. Нагревание реакционной смеси до 60 °C значительно ускоряет процесс удаления покрытия (вплоть до двукратного снижения времени удаления). Увеличение же концентрации гидроксида натрия с 2 до 10% не сказывается в заметном увеличении скорости удаления слоя защитной эмали.

Низкая скорость удаления защитного покрытия обусловлена гетерогенностью промотируемого гидроксидом натрия гидролитического расщепления. В литературе

представлен ряд сообщений об эффективной интенсификации ультразвуком многих химических превращений, протекающих в гетерогенном режиме (включая процессы гидролиза и деполимеризаци). В данной работе была использована обработка покрытых защитным слоем оптических деталей 2% раствором гидроксида натрия под действием ультразвуковых колебаний частотой 22 кГц в кавитационном режиме. В результате удалось достичь выраженного сокращения времени удаления защитного слоя. Для эффективного удаления защитного покрытия с оптических деталей требуется пятиминутная обработка оптических деталей 2% раствором гидроксида натрия под действием ультразвука. При сильных загрязнениях время обработки может быть увеличено до 10 минут. Увеличение ультразвуковой частоты 44 кГц не привело к заметному ускорению процесса удаления защитного покрытия. Столь выраженное ускорение удаления защитного слоя под действием ультразвука может быть объяснено не только механохимической интенсификацией гетерогенного процесса гидролиза, но также и разрывом ковалентных сложноэфирных, гликозидных и иных ковалентных связей под действием ультразвуковых колебаний. Внешний вид оптических деталей до и после обработки 2% водным раствором гидроксида натрия под действием ультразвуковых колебаний (Рис. 1) отчётливо демонстрирует эффективность разработанного подхода.





Рисунок 1 – Оптические детали до (а) и после (б) обработки 2% NaOH под действием ультразвука

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Agvaantseren T		162
Doan Dinh Phuona	15	5 165
		1/1
		155
Maashaa D		162
Wong IT		1/1
Wanig J. I.	•••••	141
		170
	•••••	170
	•••••	84
Аксенов Д.А.	4.0	
Аксенова Г.А.	10	3, 132
Акула И.П		
Андреев В.А.	•••••	155
Анисович А.І.		42
Аплевич А.В.		100
Асфандияров Р.Н		61
Багрец Д.А.		155
Банникова И.А.		55
Барсуков А.Р.		24, 30
Барсуков Р.В.	15, 24, 3	0, 115
Бачурин Д.В		81
Безус Ю.А.		52
Белоцерковский М.А.		36
Богдан П.С		18
Боднарь О.Б.		152
Боченков А.С.		105
Варюхин В.Н.		94
Винокуров С.А.	12	6, 132
Волк В.В.		
Волков А.Е.		74
Волочко А.Т.		84
Вьюгинова А.А.		
Генне Л В		115
Голубев Р А	1	1 160
Голых Р.Н. 15	5 24 30	39 67
Григорьев А Я	, <u> </u>	3 123
Гупьпа Л Ю		135
Гурбанович Ал В		100
Гурбанович Ан В		100
		157
	15	7 170
	13	7, 170
	16	5 172
		5, 175 5 170
	00, 91, 13	3, 149
	•••••	140
	~ ⊾	140
	17	\cup , $1/2$
дрооышев в.к.		
		11,62
Ефремов Д.В.		55

Жарко Н.А		88
Железков О.С		21
Звягина Е.Ю		21
Казанцев И.В		15
Казьмин А.А.		168
Кедров В.В		129
Киндрук А.Н		18
Киприянов Д.А		58
Киселев А.П.		126
Классен Н.В		132
Клубович В.В		45
Ковалько М.С		84
Кожушко В.В		123
Коновалов С.В	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	65
Короткевич С.В		49
Критченков А.С	11. 62. 160.	173
Критченков И.С.	, _ , ,	160
Криштал М.М		8
Кузнечик О.О		36
Кузьмар И.И.		135
Кулак М.М		143
Курилёнок А.А	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	36
Кушнер Л.К		135
Лабецкий В.С		155
Лабунский Д.Н		65
Лапатко П.Ю		100
Ласковнев А.П		42
Литвинко А.А.		71
Ломач М.С		170
Луцко В.Ф		173
Малашенко В.В		94
Маркевич М.И.		42
Маркова Г.В.		27
 Марукович Е.И		118
Махмудов Х.Ф	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	95
Мерсон Д.Л		8
Минчук В.С.		149
Митю́к В.И	· · · · ·	100
Мозжаров С.Е.		168
Муллакаев М.С		152
Муллакаев Р.М		152
Мурзинова М.А		81
Мухаметгалина А.	A	81
Муякшин С.И		138
Лышкин Н.К		63
Назаров А.А.	61	, 81
Наймарк О.Б.		149
Нарушко Е.О.	,	173
Нестеров В.А		146
Никифорова И.В.		165
Николаев А.Л	- ,	88

Николайчик Ю.А
Пермякова Д.Б
Покилов А.П. 129–132
Полунин А.В
Растегаев И.А 8
Римский Г.С100
Романова В.А 58
Рубаник В.В. 84, 100, 141, 149, 155, 157, 160, 162, 165, 168, 170, 173
Рубаник В.В. мл. 100, 155, 160, 162, 165, 170
Рубаник О.Е162
Румянцев В.В 52
Савицкий В.О165
Сазанков А.П111
Самолетов В.Г143
Сергиенко В.П120, 123
Сидоров В.А13, 71
Сосновский И.А
Степаненко Д.А
Степаненко С.А
Стеценко А.В
Отеценко Б.Ю

Терентьев С.А3	9, 108
Тертишников П.П	108
Топоркова А.А	132
Уваров С.В	55
Урбан В.И	155
Фахретдинова Э.И	61
Федоров С.А	52
Хина Б.Б	45
Хмелев В.Н15, 39, 67, 105, 108 146	3, 115,
Хоу Ябо	112
Хубиев О.М.	11
Худанов У.О	42
Царенко Ю.В.	141
Цебрук И.С 103, 12	6, 129
Цыганок С.Н 15, 24, 30, 6	7, 146
Чекан Н.М	42
Чернов В.В	138
Черноус Д.А	111
Черняева Е.В	74
Чмель А.Е	95
Шакура В.А	24, 30
Шалунов А.В 39, 67, 105, 108, 11	5, 146
Шафеев М.Р	8
Шаяхметова Э.Р	81
Шебеко В.П.	91
Шепелевич В.Г	157
Шилин А.Д 16	0, 162
Шилько С.В.	111
Щербаков И.П.	95
Янушкевич К.И	100

СОДЕРЖАНИЕ

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ Вьюгинова А.А., Новик А.А., Новик А.А.
ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Полунин А.В., Растегаев И.А., Шафеев М.Р., Мерсон Д.Л., Криштал М.М
НОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛИРУЕМОГО ВЫСВОБОЖДЕНИЯ АНТИБИОТИКОВ Критченков А.С., Егоров А.Р., Хубиев О.М., Голубев Р.А.
АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛИ ИЗМЕРЕНИЕМ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ Пантелеенко Ф.И., Сидоров В.А
КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ УЗ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПОКРЫТИЙ Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Цыганок С.Н.,Казанцев И.В.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ Степаненко Д.А., Киндрук А.Н., Богдан П.С. 18
УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ Платов С.И., Железков О.С., Звягина Е.Ю
РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ УДАРНЫХ ВОЛН НА МЕЖФАЗНЫЕ ГРАНИЦЫ Цыганок С.Н., Голых Р.Н., Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р.
МЕХАНИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОРИСТОГО ПОРОШКОВОГО СПЛАВА Ті-18Zr-15Nb Маркова Г.В., Пермякова Д.В.
УЛЬТРАЗВУК КАК СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ КАРБОНОВОГО СЛЕДА Цыганок С.Н., Голых Р.Н., Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р
ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ ХРОМИСТЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В.
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ Сосновский И.А., Белоцерковский М.А., Курилёнок А.А., Кузнечик О.О
МЕХАНИЗМЫ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СУШКИ Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А., Голых Р.Н., Нестеров В.А

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ ТАНИДНОГО ДУБЛЕНИЯ Анисович А.Г., Ласковнев А.П., Маркевич М.И., Акула И.П., Чекан Н.М., Худанов У.О42	2
МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА СВС Хина Б.Б., Клубович В.В., Кулак М.М.	5
ИНВАРИАНТЫ Короткевич С.В. 49	Э
ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В НЕСОВЕРШЕННОЙ 1D-СВЕРХРЕШЕТКЕ Безус Ю.А., Румянцев В.В., Федоров С.А.	2
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРО- И СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КАК МЕХАНИЗМА ИНИЦИИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ Ефремов Д.В., Банникова И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б.	5
ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРОЗВУКОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЙ ДЕФЕКТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 6-10 кВ И 6-35 кВ Киприянов Д.А., Дробышев В.К., Романова В.А.	8
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РКУП И УЛЬТРАЗВУКА Аксенов Д.А., Назаров А.А., Фахретдинова Э.И., Асфандияров Р.Н	1
УЛЬТРАЗВУК-ОПОСРЕДОВАННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ЦИПРОФЛОКСАЦИН- ХИТОЗАНОВЫХ КОНЪЮГАТОВ И ИХ БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Егоров А.Р., Критченков А.С	2
АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ТРИБОТЕХНИКИ Григорьев А.Я., Мышкин Н.К. 63	3
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ 7075 Панченко И.А., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В., Дробышев В.К.	5
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА МАТЕРИАЛЬНЫЕ СРЕДЫ	-
Толых Р.н., хмелев В.н., шалунов А.В., цыганок С.н. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Оковитый В.В., Сидоров В.А., Литвинко А.А.	1
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИАГРАММА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ТИТАНА Волков А.Е., Черняева Е.В	4
МАЛОГАБАРИТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АГРЕГАТ МУЗА1-8-0,8 ДЛЯ ОЧИСТКИ ФИЛЬТРОВ И ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ Петушко И.В.	5

МАЛОГАБАРИТНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УСТАНОВКА МУЗУ1-0,16 ДЛЯ ОЧИСТКИ МИКРОКАПИЛЯРНЫХ ИЗДЕЛИЙ Петушко И.В.	8
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ: ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ Назаров А.А., Бачурин Д.В., Мурзинова М.А., Мухаметгалина А.А., Шаяхметова Э.Р.	1
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЗ-КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ В ЧУГУНАХ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКЕ Волочко А.Т., Ковалько М.С., Рубаник В.В., А. Nofal	4
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ Жарко Н.А., Минчук В.С., Николаев А.Л., Дежкунов Н.В.	8
ЭРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ И КАВИТАЦИОННЫЙ ШУМ В НЕОДНОРОДНОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ Минчук В.С., Перхунова А.Ю., Шебеко В.П., Дежкунов Н.В.	1
ВЛИЯНИЕ МАГНИТОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА АМПЛИТУДНО- НЕЗАВИСИМОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ Варюхин В.Н., Малашенко В.В.	4
ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИ В КОМПРЕССИОННО СЖАТОМ ГРАНИТЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Махмудов Х.Ф., Щербаков И.П., Чмель А.Е	1 5
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОСТАВОВ Sb ₂ Te ₃ , Sb _{2-x} Cr _x Te ₃ , Sb _{2-x} Fe _x Te ₃ Аплевич А.В., Гурбанович Ан.В., Гурбанович Ад.В., Лапатко П.Ю., Митюк В.И., Рубаник В.В. мл., Рубаник В.В., Римский Г.С., Янушкевич К.И	0
НАПРАВЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПОЛИМЕРАХ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ Аксенова Т.А., Классен Н.В., Цебрук И.С.	3
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОАГУЛЯЦИИ ЗА СЧЕТ ВТОРИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Боченков А.С.	5
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИЛА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А., Тертишников П.П	8
ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ Шилько С.В., Сазанков А.П., Черноус Д.А	1
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ	
Марукович Е.И., Николайчик Ю.А., Хоу Ябо11	2
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТіNі СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ ИОННО- ПЛАЗМЕННОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Багрец Д.А., Лабецкий В.С., Урбан В.И., Андреев В.А., Luong Van Duong, Doan Dinh Phuong	55
---	----
МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИЛУМИНОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЕССОВАНИЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ Рубаник В.В., Шепелевич В.Г., Гусакова О.В., Гусакова С.В	57
ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ [Mg/Fe-NO₃ ⁻] ПО ОТНОШЕНИЮ К ХРОМАТ-ИОНАМ CrO₄ ²⁻ Голубев Р.А., Критченков А.С., Критченков И.С., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Шилин А.Д10	60
ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОРИСТОМ СПЛАВЕ Ni-Ti, ПОЛУЧЕННОМ МЕТОДОМ СВС ПОСЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ШИХТЫ Рубаник В.В. мл., Рубаник В.В., Ломач М.С., Рубаник О.Е., Шилин А.Д., Maashaa D., Agvaantseren T.	62
УСТАНОВКА ДЛЯ СИНТЕЗА ГРАФЕНА МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Луцко В.Ф., Дедюро В.В., Савицкий В.О., Никифорова И.В., Bui Hung Thang, Doan Dinh Phuong10	65
СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И НАСТРОЙКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ Луцко В.Ф., Рубаник В.В., Мозжаров С.Е., Волк В.В., Степаненко С.А., Казьмин А.А10	68
СТРУКТУРА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А7 ПОСЛЕ РКУП С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ Рубаник В.В., Гусакова С.В., Рубаник В.В. мл., Ломач М.С., Луцко В.Ф., Дородейко В.Г., Wenjing W., Yaohua Y.	70
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ Дородейко В.Г.	72
УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ Рубаник В.В., Луцко В.Ф., Критченков А.С., Дедюро В.В., Нарушко Е.О	73
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	75

Научное издание

ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА: РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы IV международной научной конференции

(Витебск, 29-31 марта 2023 года)

Оформление и компьютерная верстка А.Н. Ужекиной

Подписано в печать 28.03.2023. Формат 60*84/8. Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ.л. 29,5. Науч.изд. л. 34,18. Тираж 30 экз. Заказ № 105.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь». Свидетельства о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/161 от 27.01.2014, №2/41 от 29.01.2014. Ул. Кальварийская,17,220004, г.Минск