

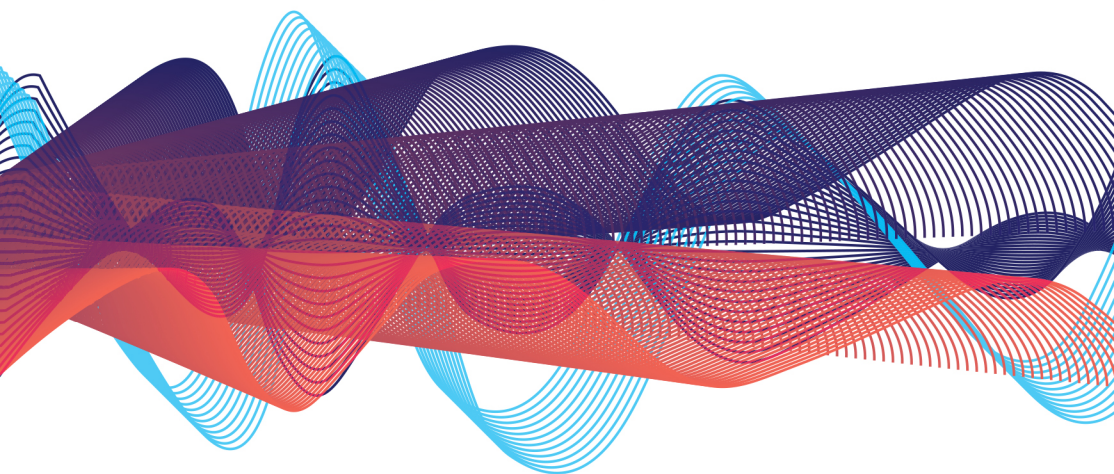
ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА: РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

(ТА-2025)

V Международная научная конференция

Тольятти, 19–21 мая 2025 года

Сборник материалов



Тольятти
Издательство ТГУ
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Межгосударственный координационный совет
по физике прочности и пластичности материалов

Институт технической акустики НАН Беларуси

ООО «ЛАЭС»

НИИ прогрессивных технологий ТГУ

Передовая инженерная школа «Гибридные и комбинированные
технологии»

Тольяттинский государственный университет

**ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА:
РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ
(ТА-2025)**

V Международная научная конференция

Тольятти, 19–21 мая 2025 года

Сборник материалов

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 681.88(063)
ББК 30.615я431
Т505

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, профессор Д.Л. Мерсон (ответственный редактор);
канд. техн. наук Е.В. Черняева (ответственный за выпуск сборника).

Рецензент

д-р физ.-мат. наук, профессор А.А. Назаров.

Т505 Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы (ТА-2025): V Международная научная конференция, Тольятти, 19–21 мая 2025 года : сборник материалов / отв. ред. Д.Л. Мерсон. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2025. – 106 с. : обл. – ISBN 978-5-8259-1703-0.

В сборнике опубликованы материалы, представленные на V Международной научной конференции «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы» специалистами в области ультразвуковых технологий из России и ближнего зарубежья, посвященные вопросам применения ультразвука для модификации свойств материалов, оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением, сварки, резки, упрочнения, изменения свойств обрабатываемых сред, неразрушающего контроля и для других целей.

Предназначен для специалистов в области ультразвука, материаловедения, технологии машиностроения, неразрушающих методов контроля, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 681.88(063)
ББК 30.615я431

Рекомендовано к изданию Научно-исследовательским институтом прогрессивных технологий Тольяттинского государственного университета.

ISBN 978-5-8259-1703-0

© Авторы статей, 2025

© Оформление. Издательство ТГУ, 2025

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕССВИНЦОВОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ТИПА NBT

Рубаник В.В.¹, Фролов В.К.¹, Шилин А.Д.¹, Рубаник В.В. мл.¹,
Пелаис-Барранко А.²

¹ ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси»,
Витебск, Республика Беларусь

ita@vitebsk.by

² Институт материаловедения и технологий, Гаванский университет, Гавана, Куба

Из исходных компонентов Na_2CO_3 , TiO_2 и Bi_2O_3 готовилась шихта. Смешивание проводили в яшмовой ступке с применением спирта. Затем порошок прессовали в брикеты диаметром 20 мм и высотой 10 мм для последующего синтеза. Температура синтеза составляла 850 °С, время синтеза 5 часов 3 часа подъем температуры, 2 часа выдержка. Во избежание отклонения от рассчитанного стехиометрического состава в следствии испарения летучих оксидов синтез осуществляли в закрытом тигле с засыпкой того же состава. По аналогичной технологии были получены образцы состава $(1-x)\text{NBT}-x\text{BT}$ где $x = 0.1, 0.12$.

Стехиометрические смеси исходных порошков NBT и NBT-BT, полученные после синтеза, подвергали ультразвуковой механоактивации на частоте ~22 кГц и мощности генератора 2 кВт в дистиллированной воде в течении 30 минут (рис. 1).

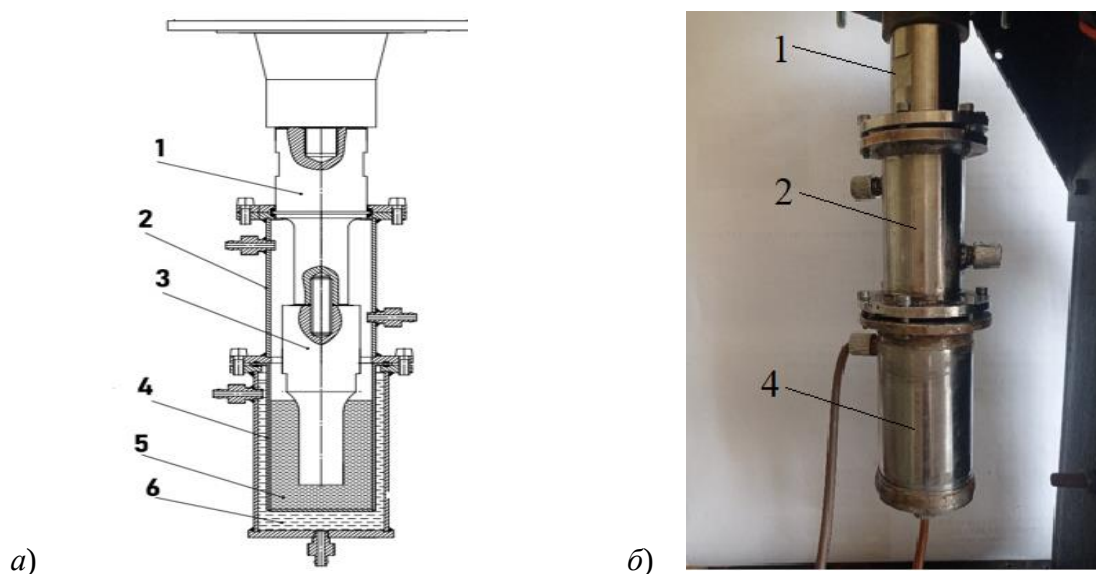


Рис. 1. Схема (а) и вид (б) акустического узла для ультразвуковой механоактивации:
1 – бустер, 2 – корпус реакторной камеры, 3 – волновод, 4 – стакан,
5 – обрабатываемая среда, 6 – охлаждающая жидкость

Результаты гранулометрического анализа показали, что у порошка, подвергнутого ультразвуковой обработке, уменьшается степень агломерации частиц, а также происходит их измельчение. Так при среднем размере агломератов частиц исходного порошка 67.5 μm , после ультразвуковой обработки средний размер частиц составил 5.7 μm .

Для прессования синтезированного порошка с применением ультразвуковых колебаний использовали генератор мощностью 0,4 кВт с частотой ~ 22 кГц и ручной гидравлический пресс (рис. 2). Усилие прессования составляло 35 кПа.

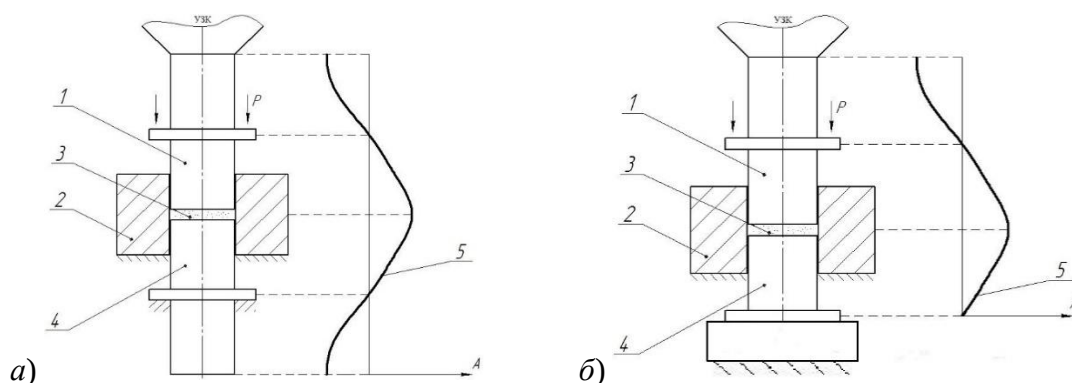


Рис. 2. Схема акустического узла с полуволновым (а) и четвертьволновым (б) отражателем для ультразвукового прессования порошка: 1 – полуволновой волновод-пуансон, 2 – матрица, 3 – порошок, 4 – отражатель, 5 – эпюра механических смещений.

Полученные пресс-заготовки спекали в закрытом тигле при температуре 1150 °С в течении 5 часов. Затем для придания плоско параллельности торцевым поверхностям образцы шпифовались. Электроды наносили путем вжигания серебряной пасты. Диэлектрические измерения проводились по стандартной методике на частоте 1кГц с помощью измерителя иммитанса Е7-20.

Измерение диэлектрической проницаемости показало, что применение ультразвуковых колебаний на различных этапах синтеза пьезокерамики на основе NBT приводит к увеличению значений диэлектрической проницаемости (рис. 3).

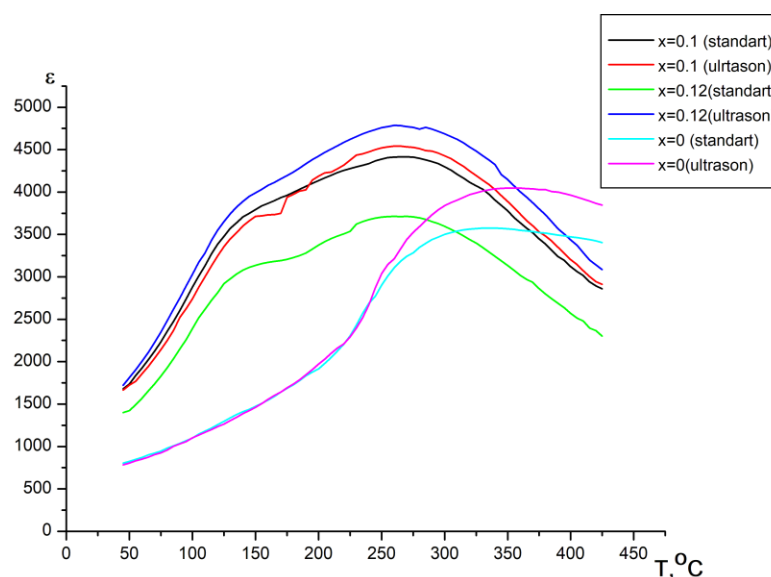


Рис. 3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ

Значение диэлектрической проницаемости возросло для образцов каждого состава полученных с применением ультразвуковых колебаний. Наилучшее увеличение значения диэлектрической проницаемости наблюдается для состава с $x = 0.12$.

Таким образом, применение ультразвуковых колебаний на этапе механоактивации и прессования позволяет получать образцы с увеличенным значением диэлектрической проницаемости, в отличие от образцов, полученных по стандартной технологии.

МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ Ti-55,16 вес.%Ni ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рубаник В.В.¹, Рубаник В.В. мл.¹, Багрец Д.А.¹, Урбан В.И.¹,
Luong Van Duong², Doan Dinh Phuong²

¹ ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», Витебск,
Республика Беларусь
ita@vitebsk.by

² Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi,
Vietnam
duonglv@ims.vast.ac.vn

Сплавы никелида титана находят все более широкое применение в качестве функционального материала нового поколения – т.н. “smart” материала – благодаря эффектам памяти формы. Кроме того, данные сплавы характеризуются высокими прочностными и пластическими свойствами, механоциклической и термоциклической долговечностью, коррозионной стойкостью и биологической совместимостью. Для расширения номенклатуры их практического использования выполняются систематические исследования структурных и фазовых превращений в них, а также различных функциональных свойств; разрабатываются новые составы и технологии обработки. **Целью работы** являлось исследование параметров мартенситных превращений, реализуемых в сплаве Ti-55,16 вес.%Ni (далее по тексту – TiNi) после комбинированной обработки, включавшей осаждение покрытия нитрида титана (TiN) и ультразвуковую обработку (УЗО) поверхностного слоя с помощью разработанной авторами экспериментальной установки ультразвуковой упрочняющей чистовой обработки плоских заготовок.

Кинетику и температуры мартенситных превращений (МП) образцов TiNi в состоянии поставки и после комбинированной обработки исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью прибора NETZSCH DSC 214 POLYMA. Скорость охлаждения и нагрева образцов составляла 10 °С/мин.

На ДСК-кривых исследуемых образцов в интервале от -50 °С до 150 °С обнаружены пики выделения и поглощения тепла (рис. 1), соответствующие мартенситным превращениям B2↔B19’.

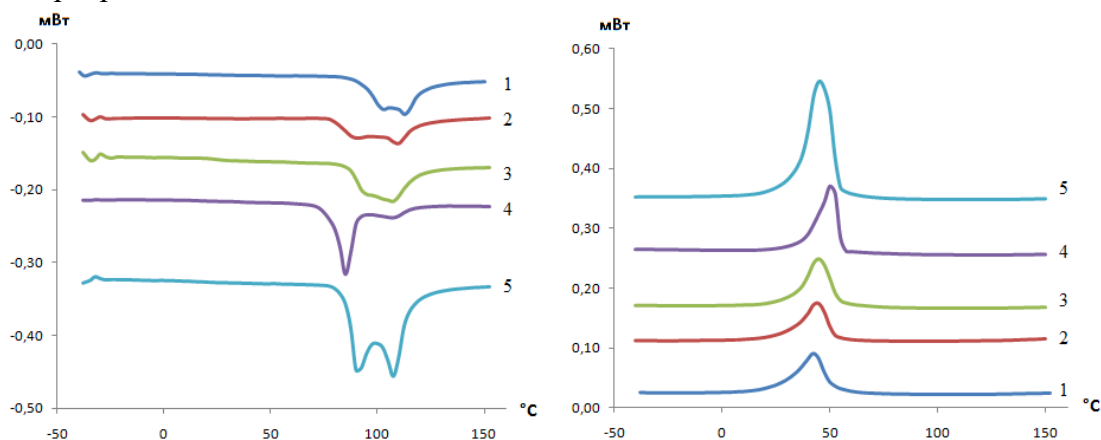


Рис. 1. ДСК-кривые, полученные при нагреве (слева) и охлаждении (справа) образцов TiNi в состоянии поставки (1) и после обработки:
2 – УЗО, 3 – УЗО+TiN, 4 – TiN, 5 – TiN+УЗО

Для исходного образца (рис. 1, кривые 1) можно отметить, что прямое МП при охлаждении начинается при $M_n = 51$ °С и завершается при $M_k = 25$ °С. Скрытая теплота превращения составила 6,5 Дж/г. Обратное МП при нагреве происходит двухстадийно: начинается при $A_n = 93$ °С и завершается при $A_k = 122$ °С. Подобная двухстадийность обратного МП характерна для всех исследуемых образцов, однако степень влияния последующей обработки – разная: УЗО (рис. 1, кривые 2) не приводит к каким-либо значимым изменениям, также как и последующее осаждение TiN-покрытия (кривые 3). Наибольший интерес представляет образец TiN (кривые 4), для которого 2-й пик перехода B19'→B2 практически отсутствует. Последующая ультразвуковая обработка (кривые 5) вновь способствует реализации обратного МП в две стадии с существенным, более чем в 2 раза, увеличением скрытой теплоты превращения.

Можно предположить, что основной причиной таких изменений является нагрев образца в процессе осаждения TiN-покрытия, особенно, на этапе ионной бомбардировки (~ 700 °С). Сопоставление ДСК-кривых исследуемого сплава TiNi после осаждения покрытия и отжига при 700 °С в течение 20 мин выявило практически полную их идентичность, что подтверждает вывод о преимущественно термической природе изменения кинетики МП. В то же время, если осаждению покрытия предшествовала УЗО (т.е. обработка поверхностным пластическим деформированием), температура нагрева при осаждении и/или длительность процесса оказались недостаточными для устранения эффекта деформационного воздействия, обусловленного УЗО.

Для выявления особенностей двухстадийности обратного МП в исследуемом сплаве TiNi использовали методику термоциклирования. В результате после нескольких термоциклов наблюдался эффект стабилизации мартенсита и реализация обратимого одностадийного B2↔B19' перехода, параметры которого представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры мартенситных превращений в сплаве TiNi после комбинированной обработки по схеме TiN+УЗО

Число проходов инструмента при УЗО, n	M_n , °С	M_k , °С	A_n , °С	A_k , °С	$\Delta H_{A \leftrightarrow M}$, Дж/г
0 (режим поставки)	49	31	59	80	9
1	46	32	61	79	17
3	48	32	62	81	14
6	53	34	63	86	12

Таблица 2. Параметры мартенситных превращений в сплаве TiNi после комбинированной обработки по схеме УЗО+TiN

Число проходов инструмента при УЗО, n	M_n , °С	M_k , °С	A_n , °С	A_k , °С	$\Delta H_{A \leftrightarrow M}$, Дж/г
0 (режим поставки)	49	31	59	80	9
1	46	34	63	78	6,5
3	53	36	65	85	7,5
6	54	36	65	87	13,5

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T21B-004) и Vietnam Academy of Science and Technology (project code QTVY01.02/21-22).

ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОТЛИВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg–Zn–Y–Gd

Растегаев И.А.^{1*}, Хрусталеv А.К.¹, Мерсон Д.Л.¹, Растегаева И.И.¹,
Муравьева О.В.^{2,3}, Муравьев В.В.^{2,3}, Владыкин А.Л.²

¹ Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

² Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

³ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

* RastIgAev@yandex.ru

За последнее двадцать лет в мире многократно усилился интерес к магниевым сплавам системы Mg–Zn–Y–Gd. Это объясняется тем, что варьирование атомными соотношениями Y/Zn и Y+Gd/Zn позволяет в широком диапазоне управлять фазовым составом и структурными особенностями этих сплавов. В настоящее время при сохранении пластичности на уровне 10÷20% уже удалось поднять предел прочности таких сплавов до 580÷800 МПа в деформируемом состоянии и 240÷280 МПа в литом состоянии. Температура воспламенения сплавов системы Mg–Zn–Y–Gd уже доведена до +800÷1000 °С. Поэтому сплавы системы Mg–Zn–Y–Gd всерьез рассматриваются сегодня для изготовления объемных корпусных и фасонных элементов в изделиях, где требуется повысить прочность и рабочую температуру силовых элементов со снижением их веса. В связи с этим, остро встает вопрос неразрушающего контроля дефектности структуры и физико-механических характеристик элементов изделий, выполненных из магниевых сплавов системы Mg–Zn–Y–Gd.

Основной упрочняющей структурной составляющей, которую стараются добиться при легировании Mg является X- или LPSO-фаза (Long-Period Stacking Ordered), которая представляет собой соединение Mg₁₂YZn упорядоченное по типу 14H или 18R. Особенностью формирования такой структуры является:

1) неравномерность распределения по объему LPSO-фазы в трех видах: отдельные конгломераты по границам зерен матрицы α-Mg сопоставимого размера; полосчатое проникновение в зерна матрицы α-Mg наряду с внедрением включений эвтектической W-фазы (Mg₃Y₂Zn₃);

2) существенное отличие LPSO-фазы от матрицы α-Mg по плотности и модулю упругости (~ 2,7 и ~1,5 раза соответственно).

Обозначенные особенности магниевых сплавов системы Mg–Zn–Y–Gd в зависимости от количества LPSO-фазы, соответственно, должны вызывать изменение скорости распространения ультразвуковых волн в материале и, что более важно, величины её затухания. Литературный анализ показал, что на сегодня не изучено влияние размерного соотношения между основной фазой (матрица α-Mg) и вторичной LPSO-фазой на акустические характеристики новых (перспективных) магниевых сплавов систем легирования Mg–Zn–Y и Mg–Zn–Y–Gd в литом состоянии. Поэтому целью настоящей работы являлось установление обозначенных связей, которые представляют собой исходные данные для разработки методик неразрушающего ультразвукового контроля таких сплавов.

Исследования проведены на девяти литейных магниевых сплавах с LPSO-фазой, представляющих собой легатурные композиции, перекрывающих диапазон атомных соотношений первичных фазообразующих легирующих элементов $1,07 \leq Y/Zn \leq 2,32$ и элементов последующего термического дисперсионного упрочнения $1,6 \leq Y+Gd/Zn \leq 2,98$. В качестве метода исследования использовался ультразвуко-

вой импульсный эхо-метод многократных отражений с частотой волн (f): 1,25; 2,5; 5 и 10 МГц. Данным методом определяли: скорость распространения продольной (C_l) и поперечной (C_t) волн, а также коэффициент затухания продольной волны (δ_l). При определении упругих характеристик сплавов (E - модуль Юнга, G - модуль сдвига, μ - коэффициент Пуассона) использовалась их взаимосвязь со скоростью волн C_l и C_t и плотностью сплавов. Плотность сплавов (ρ) определяли через отношение массы образца к его объему, заданному формой и геометрией образца.

В результате проведенных исследований установлено, что в Mg-сплавах системы Mg-Y-Zn-Gd в диапазоне легирования $Y \leq 7,6\%$; $Zn \leq 2,78$; $Gd \leq 4,9$ и $Zr \leq 0,68\%$:

(А) Величины C_l и C_t уменьшаются, а δ_l увеличивается пропорционально суммарному весовому проценту легирующих элементов, формирующих LPSO-фазу. При этом преимущественное влияние на величину C_l и C_t в Mg-сплавах с LPSO-фазой оказывает именно изменение их плотности (ρ). В исследованном диапазоне легирования характер изменения C_l и C_t от весового процента легирующих элементов носит линейный характер и может быть описан следующими эмпирическими зависимостями:

$$C_{l_alloy} = C_{l_Mg} - 59 \cdot \%Zr - 15 \cdot \%Zn - 10 \cdot \%Gd - 6 \cdot \%Y \quad (R^2 = 0,83) \quad (1)$$

$$C_{t_alloy} = C_{t_Mg} - 26 \cdot \%Zr - 7 \cdot \%Zn - 5 \cdot \%Gd - 3 \cdot \%Y \quad (R^2 = 0,73) \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) C_{l_Mg} и C_{t_Mg} соответственно скорости продольной и поперечной волн в чушковом магнии чистоты 99,90 или 99,95, используемом при выплавке сплавов систем Mg-Zn-Y или Mg-Zn-Y-Gd.

(Б) Для пересчета скорости C_l в C_t в Mg-сплавах системы Mg-Y-Zn-Gd по упрощенной формуле может быть с высокой долей точности принято отношение $C_t/C_l = 0,549 \pm 0,002$, а для оценки коэффициентов отражения и прохождения волн через границы материала в другие среды удельное акустическое сопротивление сплавов может быть принято, соответственно, равным $C_l \rho = 10,5 \pm 0,3$ МПа·с/м и $C_t \rho = 5,8 \pm 0,2$ МПа·с/м.

(В) Коэффициент затухания волн δ_l на всех исследованных частотах ($f = 1,25; 2,5; 5$ и 10 МГц) максимально увеличился в 2,3 раза по сравнению с Mg чистоты 99,9% (Mg90). При отношении среднего размера LPSO-фазы к среднему размеру зерна матрицы α -Mg и к длине волны $(d/D)/\lambda < 1,5E-4$ преимущественно имеет место рассеивание на границах кристаллитов, т.к. коэффициент затухания больше коррелирует с зависимостью $\delta_l \sim k \cdot f^2$, где: k - коэффициент пропорциональности, f - частота волны. При $(d/D)/\lambda > 1,5E-4$ преимущественно имеет место рэлеевское рассеяние, т.к. затухание больше коррелирует с зависимостью $\delta_l \sim k \cdot f$. Пока остаётся открытым вопрос влияния LPSO-фазы в виде полосчатого внедрения в зерна α -Mg и способ её учета. Также для Mg сплавов с LPSO-фазой нельзя считать закрытым вопрос о способе подсчета параметров D и d , т.к. на сегодня отсутствуют обобщенные структурные параметры, которые характеризовали бы одновременно: неравноосность зерен матрицы, геометрию и неравномерность распределения LPSO-фазы в ней. Поиск таких обобщенных структурных параметров, коррелирующих с акустическими характеристиками Mg сплавов с LPSO-фазой является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственных заданий: FEMR-2024-0002 (исследования структуры и затухания) и FZZN-2025-0003 (определение скоростей акустических волн).

ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИКОЙ ЭМИССИИ

Растегаева И.И., Растегаев И.А., Мерсон Д.Л.

*Тольяттинский государственный университет,
Тольятти, Россия
RastIgAev@yandex.ru*

Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из методов неразрушающего контроля, который позволяет проводить дистанционный on-line мониторинг и диагностику повреждения и работоспособности узлов трения скольжения. При этом преобразователь АЭ может быть установлен не на сам диагностируемый элемент узла трения, а только иметь с ним устойчивую акустическую связь, что расширяет диапазон применения метода АЭ на узлах трения. Помимо дистанционности метод АЭ отличается высокой чувствительностью. По данным теоретических работ АЭ метод позволяет зафиксировать скачок трещины длиной 1 мкм на 1 мкм, но, с другой стороны, шумы и помехи такого же масштабного уровня влияют на результат применения метода. Также критическим при АЭ контроле является то, что метод является интегральным, т.к. итоговый АЭ сигнал является суперпозицией сигналов от всех действующих акустических источников. Последнее, с одной стороны, плюс, т.к. это даёт возможность реализовать АЭ контроль с применением даже одного преобразователя АЭ, но с другой – при одновременном действии нескольких источников АЭ синергетический результат приводит к трудностям разделения сигналов, связанных с конкретными источниками. С этим связаны большие проблемы решения обратной, наиболее важной для практики задачи: установление в реальном времени по сигналам АЭ действующих механизмов изнашивания. Все вышесказанное приводит к высокой неопределенности результатов применения АЭ метода при контроле узлов трения. Существующие решения АЭ контроля изнашивания узлов трения скольжения не имеют предварительных этапов анализа данных, поэтому подвержены сбою и требуются новые подходы, повышающие вероятность обнаружения «полезных» сигналов. В настоящей работе предлагается использовать трехэтапный многопараметрический спектрально-временной подход анализа АЭ данных.

Предлагаемый подход является синергетическим, в основу которого ставилась задача повышения вероятности идентификации трех основных диагностических событий: D_1 – нормальный (линейный) режим изнашивания, D_2 – изнашивание со схватыванием поверхностей трения в отдельных областях и D_3 – изнашивание с пластическим отеснением металла на поверхностях трения (задир). При этом основной упор ставился на выявление диагноза D_2 , как переходного от нормально D_1 к катастрофическому D_3 режиму изнашивания, что соответствует концепции ранней диагностики повреждений узлов трения для реализации оперативных мероприятий по возврату трибосопряжения к техническому состоянию D_1 . Для этого на первом этапе используется спектральный анализ каждого АЭ сигнала с целью ранжирования (кластеризации) их на группы, связанные с каждым типом источника по схеме, которая отдельно предложена и апробирована в работе [1]. Отметим, что для идентификации диагнозов $D_1 \div D_3$ на первом этапе применяются параметры: нагрузка на узел трения (вес и скорость скольжения если изменяются), присутствие сигналов кластеров D_2 и D_3 , медианная частота и эффективная ширина спектра АЭ. На втором этапе происходит усреднение данных по нескольким АЭ сигналам и используются признаки начала и окончания повреждения узлов трения с применением интегрального АЭ па-

параметра: огибающая АЭ или среднеквадратичное значение АЭ. Параметрические признаки для идентификации диагнозов $D_1 \div D_3$ на втором этапе анализа: среднее значение и размах значений интегрального АЭ параметра, и длительность существования АЭ признака, которые предложены и подробно рассмотрены в работе [2]. Третий этап анализа кумулятивный, на времени наблюдения которого рассматривается хронология проявления диагнозов D_2 и D_3 на первом и втором этапах, а также скорость приращения средней мощности в сигналах кластеров D_2 и D_3 . Здесь следует отметить, что для реализации трехэтапного анализа требуются опорные данные или образы АЭ источников при действии каждого вида повреждения, соответствующие диагнозам $D_1 \div D_3$. Опорные данные получают в предварительных исследованиях по схеме, предложенной в работе [3].

Предлагаемый подход апробирован на массиве трибологических имитаций АЭ, который состоял из 132 испытаний на трение и износ с подтверждением повреждений микроскопическими исследованиями, и включал: 20 имитаций АЭ при нормальном (линейном) режиме изнашивания (диагноз D_1), 50 – при изнашивании со схватыванием в отдельных областях (диагноз D_2) и 62 – при задирах поверхностей трения с пластическим отеснением материала (диагноз D_3). Вероятность обнаружения определялась методом Байеса в сопоставлении со стандартным пороговым методом идентификации тех же АЭ событий. Полученные результаты оценки апостериорной вероятности правильного установления диагнозов $D_1 \div D_3$ сведены в таблицу. Соответственно вероятность пропуска события равна: $1 - P(D_2)$ и $1 - P(D_3)$.

D_i	Апостериорная вероятность установления диагнозов $D_1 \div D_3$			
	пороговым методом		предлагаемым подходом	
	$P(D_2)$	$P(D_3)$	$P(D_2)$	$P(D_3)$
D_1	0,73	0,01	0,26	0
D_2	0,24	0,05	0,73	0,13
D_3	0,03	0,94	0,01	0,87

Из таблицы видно, что вероятность раннего обнаружения диагноза D_2 стандартным амплитудным пороговым методом равна 24%, а раннего обнаружения диагноза D_3 94%. Предлагаемый подход показал 73 и 87% соответственно. Таким образом, предлагаемый подход по сравнению с амплитудным пороговым методом позволил на 49% увеличить вероятность обнаружения схватывания поверхностей трения (диагноз D_2), при приемлемом (на 7 %) снижении вероятности обнаружения задира (диагноз D_3).

1. A Time-Frequency based Approach for Acoustic Emission Assessment of Sliding Wear / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, I.I. Rastegaeva, A.Yu. Vinogradov // Lubricants 2020, 8(5), 52.
2. Real time acoustic emission methodology in effective tribology testing / I.A. Rastegaev, D.L. Merson, A.Yu. Vinogradov // International Journal Microstructure and Materials Properties, 2014, Vol. 9, № 3/4/5, p. 360-373.
3. Technique for the Determination of the Critical Points under Acoustic Emission Tribological Tests / I. A. Rastegaev, D. L. Merson, A. Yu. Vinogradov, A. V. Danyuk // Inorganic Materials, 2017, Vol. 53, No. 15, pp. 1506–1512.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ ОКСИДИРОВАНИИ Al-Mg СПЛАВА В БИПОЛЯРНОМ РЕЖИМЕ

Акимов Е.Г., Растегаев И.А., Шафеев М.Р., Полунин А.В.,
Растегаева И.И., Кришгал М.М., Мерсон Д.Л.

*Тольяттинский государственный университет,
Тольятти, Россия
z.akimov@mail.ru*

Наряду с развитием технологий объемной термической, термомеханической обработки, а также методов инженерии поверхности различных материалов, одним из важнейших технологических аспектов является надежный контроль реализации технических приемов и воздействий на всех этапах обработки, который, в идеале, должен осуществляться *in situ* с применением современных высокоскоростных и высокоразрешающих систем мониторинга [1].

Одним из прогрессивных и многофункциональных методов *in situ* мониторинга явлений самой различной природы и технологических процессов является метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий в широком диапазоне возмущений и воздействий получать информацию с высокими разрешением и скоростью регистрации данных [2]. Однако применение методом АЭ в исследовательских целях, а также для построения систем обратной связи в технологических цепочках, требует его дополнительной верификации, а также разработки надежных критериев оценки процесса и его отклонений от допустимых.

Целью данной работы было выявление закономерностей и особенностей проявления акустической эмиссии в ходе реализации процесса плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) алюминиевого сплава (на примере магния AMg6) в широком диапазоне режимных параметров ПЭО как основы разработки нового метода *in situ* контроля процесса ПЭО и его оптимизации за счёт более точного выявления границ различных стадий процесса оксидирования.

ПЭО образцов из сплава AMg6 (химический состав, масс. %: 6,2 Mg; 0,65 Mn; 0,5 Ti; 0,4 Si; 0,3 Fe; 0,18 Zn; 0,087 Cu; Al – основа) с одновременной регистрацией АЭ выполняли в щелочно-силикатно-фосфатном электролите при частоте формовочных импульсов 500 Гц и коэффициенте заполнения импульса 65% в диапазоне режимов ПЭО, который практически полностью перекрывает все типовые технологические режимы обработки алюминиевых сплавов по плотностям тока (6–18 А/дм²) и токовому соотношению в полупериодах (0,7–1,3), что позволило зафиксировать и изучить акустическую эмиссию (АЭ), сопровождающую формирование оксидных слоев различного назначения. АЭ регистрировалась непосредственно с образца с помощью датчиков типа П111-(0,02-0,3) (Россия) с полосой пропускания 20–800 кГц с основной чувствительностью в диапазоне частот до 300 кГц. Далее сигналы усиливались 2-х каскадным широкополосным фильтр-усилителем MSAE-FA010 (Россия), оцифровывались и записывались кадрами длительностью 40 мс (20 полных циклов воздействия импульсов ПЭО) через 1 мин с помощью 12-ти битной платы аналого-цифрового преобразования (АЦП) Advantech PCI-1714 (Тайвань) при частоте дискретизации 2 МГц, что обеспечивало частотный диапазон анализа АЭ до 1 МГц. Синхронно с акустическими сигналами с помощью того же АЦП записывались кадры изменения напряжения и тока также по циклам ПЭО.

Регистрация АЭ совместно с визуальным отслеживанием процесса ПЭО показала, что основным стадиям ПЭО присущи характерные признаки сигналов АЭ, которые эволюционируют синхронно с наблюдаемыми микродуговыми разрядами. В начальный момент времени происходит пассивация поверхности анода и формирование «барьерного слоя» в результате химического анодирования и первичных микродуговых пробоев, что сопровождается возникновением и быстрым нарастанием амплитуды АЭ. По мере «уплотнения» барьерного слоя с одновременным образованием уже более толстого оксидного слоя микродуговые разряды усиливаются, начинают объединяться в каскады и даже переходить в отдельные дуговые разряды, что сопровождается сигналами АЭ практически постоянной и повышенной амплитуды, однако после которых, как правило, наступает стадия с резким падением амплитуды сигнала АЭ, что совпадает с практически полным визуальным исчезновением микродугов на поверхности обрабатываемого образца и началом так называемого режима «мягкого искрения» («soft sparking»). Также иногда наблюдается неизвестная ранее стадия ПЭО, при которой практически отсутствует микродуговой пробой и визуальное свечение образца, а также генерируемая им акустическая эмиссия, но имеет место некоторый прирост толщины оксидного слоя.

Обнаружено, что подход к установлению стадий ПЭО с применением стандартного параметра «амплитуда АЭ» обладает большей погрешностью, т.к. не учитывает форму сигналов и полупериод их регистрации. Учесть обозначенные признаки при разделении режимов ПЭО на стадии по АЭ позволяет предложенный новый параметр-критерий «акустико-эмиссионная медиана» (АЭ медиана), позволяющий выделить установленные в работе циклические особенности проявления АЭ. Экспериментально было выявлено, что предложенный параметр работоспособен, обладает хорошей точностью и чувствительностью к подтипам сигналов АЭ, особенно регистрируемых в режиме «мягкого искрения» («soft sparking»). Последнее представляется перспективным, так как метод АЭ становится средством исследования финальных стадий ПЭО с разрешающей способностью, равной циклу воздействия, что представляет особый интерес, поскольку именно финальные стадии ПЭО являются определяющими при формировании оксидных слоев с наивысшими твердостью и износостойкостью.

1. R. Chai et al. Review of advanced guidance and control algorithms for space/aerospace vehicles // Progress in Aerospace Sciences, 2021, vol. 122, P. 100696
2. Y. He et al. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems // Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, vol. 148, P. 107146.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ГРАФИТА ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ

Рубаник В.В., Савицкий В.О., Луцко В.Ф., Рубаник В.В. мл.

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

В настоящее время большое внимание уделяется развитию технологий с использованием углеродных наноматериалов. Нанографит является перспективным материалом, так как характеризуется особыми физико-химическими свойствами, и поэтому ведутся активные исследования по синтезу и изучению его свойств [1]. Наночастицы графита находят широкое применение в медицине и промышленности благодаря малой плотности и высоким показателям химической инертности, электро- и теплопроводности, адсорбционной активности и триботехническим свойствам.

Измельчение графита до наноразмеров проводится с помощью ультразвукового диспергирования графитовой суспензии. В процессе ультразвуковой обработки (УЗО) суспензии графита, образующиеся кавитационные пузырьки проникают вовнутрь графитовой структуры, в пространство между кристаллитами или отдельными слоями. При схлопывании пузырьков образуются вторичные ударные волны. Под их действием происходит разрыв связей в графите, разрушение его структуры [2]. Ультразвуковая обработка графита в жидкой среде позволяет избежать аморфизации природного графита даже при длительном воздействии [3], а диспергирование графита в водном растворе ПАВ является эффективным [4].

Для приготовления суспензии графита использовали 2,25 г вспененного графита (Exfoliated graphite powder NRE-8016, Индия), который заливался 150 мл воды с 2,25 мл ПАВ Tween-80. УЗО проводили с помощью генератора УЗГ-2-4М мощностью 1,5 кВт и частотой ~18 кГц в кавитационном режиме в течение 2 ч и 5 ч в при избыточном гидростатическом давлении 2 атм и без. Амплитуда ультразвуковых колебаний составила ~80 мкм. Обработка суспензии под избыточным гидродинамическим давлением приводит к повышению порога кавитации, что позволяет существенно повысить производительность процесса [5]. Исследование морфологии образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с рентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Ускоряющее напряжение при съемке составляло 20 кВ.

Ультразвуковое диспергирование суспензий графита привело к значительному измельчению частиц (рисунок 1). После УЗО в течение 2 ч без избыточного гидростатического давления 90% частиц имеют размер меньше 42,5 мкм. УЗО в течение 2 ч при избыточном гидростатическом давлении 2 атм позволило уменьшить размер частиц практически в 20 раз (90% частиц имеют размер меньше 2,2 мкм). Повышение времени УЗО привело к ещё большему измельчению. Так после диспергирования в течение 5 ч (как при избыточном гидростатическом давлении 2 атм, так и без) 90% частиц имеют размер меньше 0,22 мкм. На СЭМ снимках некоторые графитовые пластинки являются «прозрачными» для электронов, что обусловлено их малой толщиной.

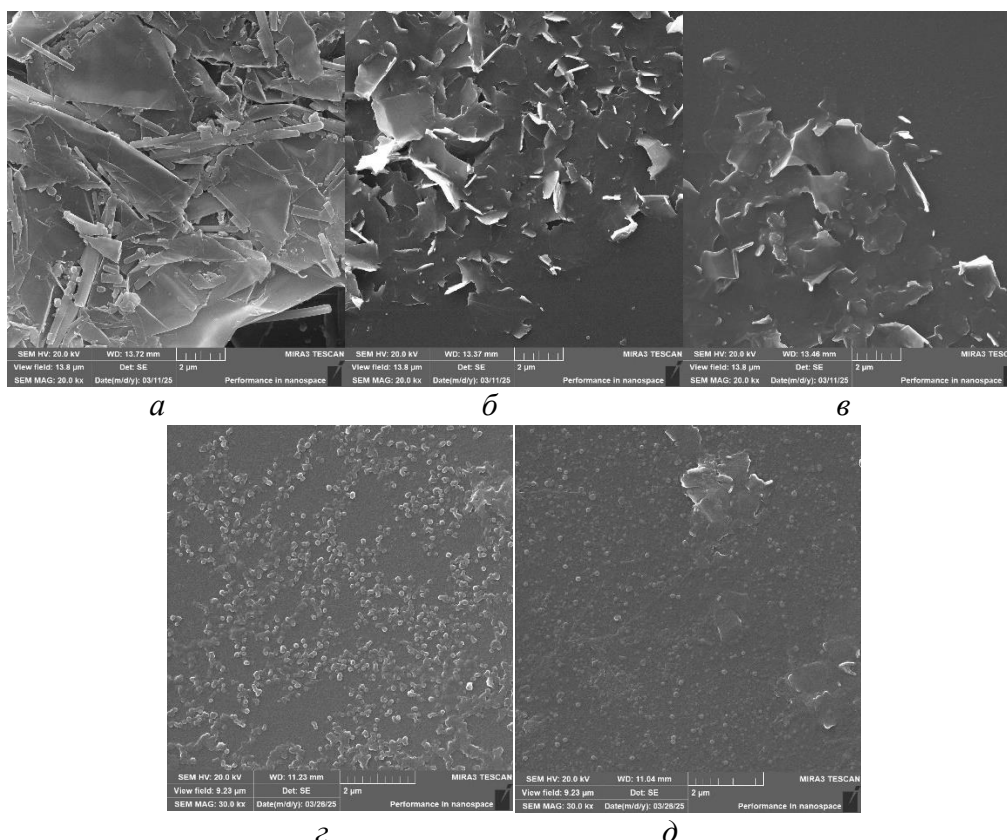


Рис. 1. Снимки СЭМ графита до УЗО (*а*) и после УЗО в течение 2 ч (*б*) и 5 ч (*в*), после УЗО при избыточном гидростатическом давлении 2 атм в течение 2 ч (*г*) и 5 ч (*д*)

Таким образом, ультразвуковое диспергирование вспененного графита в значительной степени позволяет измельчить частицы графита, а избыточное гидростатическое давление дает возможность сократить время УЗО, что в свою очередь повышает эффективность процесса.

1. Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р. Механизм проводимости нанографита, образованного осаждением в плазме метана и последующей термообработкой // РЭНСИТ. 2019. № 11 (3). С. 315–320. DOI: 10.17725/rensit.2019.11.315.
2. Ткачёв, С.В. Восстановленный оксид графена: получение, строение, свойства: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01 / С.В. Ткачёв; РАН, Ин-т общ. и неорган. химии. – М., 2012. – 25 с.
3. Получение водных суспензий графена под воздействием ультразвука в присутствии фторсодержащих ПАВ / Самойлов В.М. [и др.] // Неорган. материалы. – 2015. – Т.51, №2. – С. 137-145.
4. Кульметьева В.Б., Поносова А.А. Получение графенсодержащих суспензий диспергированием в водных растворах ПАВ // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2.
5. Патент на полезную модель №7179 «Устройство для диспергирования и гомогенизации» опубл. 2011.04.30//Свиридюнок А.И., Игнатовский М.И., Кравцевич А.В., Бородуля В.А., Рубаник В.В., Махановская О. Н., Багрец Д.А.

УСТАНОВКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРОТОЧНЫМ МЕТОДОМ

Луцко В.Ф., Шакуров И.А., Рубаник В.В., Савицкий В.О.,
Рубаник В.В. мл.

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

На сегодняшний день тонкие графитовые пластинки являются востребованным материалом в производстве тонких покрытий, прочных и легких композитов, производительных чипов в углеродной наноэлектронике. Известно, что наиболее эффективно разрушение агрегатов наночастиц происходит в жидких средах под действием ультразвуковых колебаний (ультразвуковое диспергирование наночастиц). Ультразвуковая обработка позволяет получать высокодисперсные, однородные и химически чистые суспензии [1].

Повысить производительность процесса диспергирования графита можно высокоамплитудной ультразвуковой обработкой (УЗО) суспензии графита проточным методом под избыточным давлением [2,3]. УЗО 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 под избыточным гидродинамическим давлением приведет к повышению порога кавитации, что позволяет существенно повысить производительность процесса [4].

Проводить высокоамплитудную УЗО суспензии графита проточным методом под избыточным давлением позволяет созданная в ИТА НАН Беларуси экспериментальная установка (рисунок 1) для ультразвукового диспергирования проточным методом [2-4].

Установка включает ультразвуковой генератор, который подает электрические сигналы с регулируемой мощностью к ультразвуковому преобразователю 1, который преобразует электрическую энергию в механическую той же частоты. С помощью 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 зону обработки фиксируется расходомером 10. Контроль температуры обрабатываемой суспензии осуществляется с помощью термодатчика 11. Процесс обработки состоит из прокачки обрабатываемой суспензии из смесителя 6 в смеситель 13 через реактор 4. После чего можно повторить прокачку в обратном направлении через реактор 4. По окончании УЗО обработанная суспензия сливается через сливной кран 8.

Установка для ультразвукового диспергирования проточным методом позволяет вести высокоамплитудную ультразвуковую обработку жидких сред, 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.

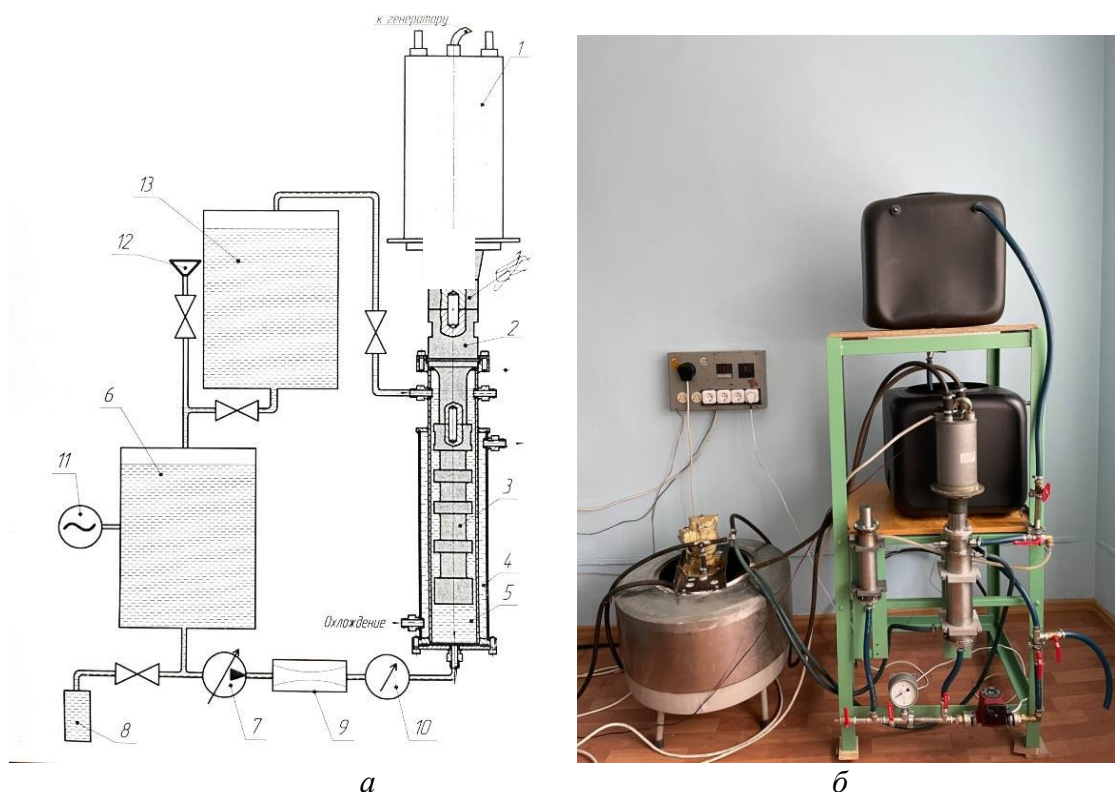


Рис. 1. Блок – схема (а) и внешний вид (б) установки для ультразвукового диспергирования проточным методом

1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – бустер, 3- волновод излучатель, 4– реактор, 5 – обрабатываемая суспензия, 6, 13 – смеситель, 7 – насос, 8 – сливной кран, 9 – дроссель, 10 – расходомер, 11 – термодатчик ЦР 8002 с ТМС, 12 – заливная горловина

Разработанная экспериментальная установка также позволяет обрабатывать до 100 л графитовой суспензии за 1 цикл, производить диспергирование и ультразвуковую механоактивацию других порошковых материалов.

1. 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
2. Патент на полезную модель №7602 «Установка для ультразвукового диспергирования порошковых материалов» опубл. 2011.03.25. // Луцко В.Ф., Мозжаров С. Е., Шрубинов С.Н.
3. 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
4. Патент на полезную модель №7179 «Устройство для диспергирования и гомогенизации» опубл. 2011.04.30//Свириденок А.И., Игнатовский М.И., Кравцевич А.В., Бородуля В.А., Рубаник В.В., Махановская О. Н., Багрец Д.А.

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ БЕТА-ФАЗЫ ОКСИДА ГАЛЛИЯ

Калганов Д.А.^{1,2}, Панов Д.Ю.¹, Спиридонов В.А.¹, Бауман Д.А.¹,
Романов А.Е.¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
kalganov@itmo.ru

Разработка новых устройств преобразования электрической энергии требует создания функциональных материалов с особыми характеристиками, такими как высокое напряжение пробоя, большая диэлектрическая проницаемость, температурная стойкость. Монокристаллический оксид галлия позволяет создавать объемные элементы и подложки для эпитаксии, что обеспечивает технологическое преимущество в использовании этого полупроводника [1-3].

В работе акустическим методом [4-5] на частоте ультразвука около 100 кГц получены значения внутреннего трения и модуля Юнга в кристаллах бета фазы беспримесного оксида галлия Ga₂O₃, а также оксида галлия, легированного алюминием β -(Al_{0,01}Ga_{0,99})₂O₃. Монокристаллические образцы были получены скалыванием вдоль оси роста <010>. Кристаллическая структура образцов была дополнительно исследована при помощи рентгеновской высокоразрешающей дифрактометрии.

В исследованных образцах, вне зависимости от примеси Al, наблюдались схожие характеристики кристаллического совершенства – в условиях симметричного рефлекса типа 600 (CuK_{α1}, Ge220) кривые качания двухкристальной дифракции с полушириной FWHM ≈ 32" и симметричные кривые ω -2 θ трехосевой дифракции с полушириной FWHM ≈ 15". Установлено, что примесь алюминия увеличивает фоновое внутреннее трение на величину до 7 % и незначительно уменьшает (с 257 ГПа до 246 ГПа) величину модуля Юнга в данном направлении при комнатной температуре.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00229, <https://rscf.ru/project/24-12-00229/>.

1. Galazka Z. et al. Two inch diameter, highly conducting bulk β -Ga₂O₃ single crystals grown by the Czochralski method // Applied Physics Letters. – 2022. – vol. 120. – №. 15. – P. 152101.
2. Lavelle R. M. et al. Chemical-mechanical polishing improvements and subsurface damage elimination for Cz grown (010) β -Ga₂O₃ substrates // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2025. – vol. 190. – P. 109341.
3. Wang X. et al. Research Progress and Prospect of the Bulk Single Crystal Growth of β -Ga₂O₃: from 1964 to 2024 // Crystal Research and Technology. – 2025. – P. 2400255.
4. Guzilova L. I. et al. Elasticity and Inelasticity of bulk GaN crystals // Technical Physics. – 2020. – vol. 65. – P. 128-132.
5. Kaminskii V. V. et al. Effect of high-temperature annealing on the internal friction and optical transmittance of single crystal gallium oxide // Materials Physics and Mechanics. – 2024. – vol. 52. – №. 5. – P. 48-54.

СРАВНЕНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО ФРАКТАЛЬНЫМ РАЗМЕРНОСТЯМ И СРАВНИТЕЛЬНЫМ ДИАГРАММАМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Волков А.Е.¹, Черняева Е.В.¹, Казаринов Н.А.², Волкова Н.А.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы анализа сигналов акустической эмиссии (АЭ), направленного на исследование изменения состояния материала образцов в результате их испытаний.

Сигналы АЭ генерируются при быстром изменении напряженного состояния (разгрузке) в отдельных областях нагруженного тела (металла, композита, горной породы) в результате произошедшей в них неупругой деформации посредством дислокационного сдвига, двойникования, мартенситного превращения, разрушения посредством образования или продвижения трещины, а также в результате распространения коррозии. Следовательно, по параметрам сигналов можно судить о структуре материала (наличии и размере включений, плотности дислокаций и их подвижности, плотности микротрещин). Однако, получить информацию непосредственно об источниках АЭ очень сложно ввиду искажений сигналов из-за дисперсии звуковых волн, неодинакового затухания на разных частотах, отражений от свободных поверхностей образца, искажений, создаваемых датчиком, волноводом и усилителем электрических колебаний.

Цель данной работы – сравнить характеристики сигналов, полученных на "свежих" (контрольных) образцах и образцах, испытавших механические воздействия. Первый рассмотренный способ – выявление различий сигналов путем построения сравнительной диаграммы спектров, представляющей модуль отношения усредненных Фурье-образов сигналов. Другой способ основан на поиске таких характеристик, которые не изменяются под действием многих из перечисленных искажений. Поскольку график спектральной плотности мощности имеет сложную изломанную форму, он может быть рассмотрен, как фрактальная кривая. Ее важнейшей характеристикой является фрактальная размерность, которая определяется условиями формирования сигналов и, следовательно, может служить признаком для их классификации.

Для примера исследовали образец из стали 20, который предварительно подвергли циклическому нагружению от напряжения $\sigma = 0$ до напряжения $\sigma_{\max} = 1,2\sigma_T$, (σ_T - предел текучести) и разгрузке до нуля, с частотой $f = 20$ Гц. Испытание прекратили на 8851-м цикле, когда сформировалась «шейка», а относительное удлинение составило 15%. Сравнивали сигналы АЭ, возникающие при индентировании образца в областях, расположенных на различных расстояниях от шейки и, следовательно, испытавших различные деформации и получивших различные изменения плотности дефектов и поврежденности. Фрактальная размерность спектров мощности при приближении к зоне шейки снижалась с 0.72 до 0.62. На сравнительной диаграмме спектров выделялись пики вблизи частот 270 кГц и 680 кГц. Таким образом, рассмотренные характеристики могут служить признаками для классификации сигналов, а их изменения, позволяют оценить степень изменения состояния образцов в результате механических испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект 116636233).

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ

Царенко Ю.В.^{*1}, Рубаник В.В.¹, Найзабеков А.Б.², Лежнев С.Н.²

¹ ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», Витебск,
Республика Беларусь

² НАО «Рудненский индустриальный университет», Рудный, Республика Казахстан
^{*} labpt@vitebsk.by

Главный недостаток наиболее распространенных и изученных методов интенсивной пластической деформации (ИПД), равноканального углового прессования и кручения под высоким давлением, препятствующий широкому промышленному внедрению – ограничения в размерах образцов и крайне низкая технологичность производства. Устранить эти недостатки можно, используя такой способ ИПД, как радиально-сдвиговая прокатка (РСП), которая также позволяет получать ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру, но уже в длинномерных круглых прутках с некоторыми особенностями распределения структуры [1].

Целью исследования является установление закономерностей формирования структуры ультрамелкозернистой меди и ее сплавов, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки, при ультразвуковой обработке (УЗО).

Объектами исследования служили образцы меди М1 и медных сплавов марки Л63 и ЛЖМц66-4-7, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки [2]. Оптимальным способом ультразвукового воздействия на УМЗ материалы, с точки зрения эффективности знакопеременного механического воздействия является способ, в котором обработка образцов осуществляется в пучности напряжений стоячей волны волновода в закреплённом состоянии [3].

Для определения количественных параметров структуры УМЗ материалов использовали метод рентгеноструктурного анализа (РСА). Снижение уширения рентгеновских линий свидетельствует об уменьшении микронапряжений в исследуемом образце после ультразвуковой обработки, так и некотором росте областей когерентного рассеяния (таблица 1). Размер ОКР, как правило, отождествляют со средним размером кристаллитов, определив который, можно судить о характере изменения размера кристаллитов в материале в зависимости от условий обработки. Ультразвуковая обработка привела к росту ОКР у всех образцов меди и латуни от 8 % до 20 %, причем наибольший рост наблюдался для меди М1.

Таблица 1. ОКР образцов меди и латуни

Вид обработки	Медь М1, размер ОКР, нм	Латунь Л63, размер ОКР, нм
РСП, без УЗО	13,5	12,5
РСП, УЗО 40 МПа	15,1	14,0
РСП, УЗО 70 МПа	16,3	13,7

Исследования микроструктуры (рисунок 1) показали, что УЗО образцов меди приводит к некоторому изменению размеров зерна. Размеры зерна заготовки меди М1 после радиально-сдвиговой прокатки имеют в центральной части более высокие значения, в пределах от 40 до 100 мкм, в то время как в поверхностных слоях наблюдается существенное измельчение структуры, при этом размеры зерна уменьшаются до 30 - 40 мкм (рисунок 1, б). После УЗО с амплитудой напряжений 70 МПа в поверхностных слоях образца меди наблюдается некоторое увеличение размера зерна до 35 - 40 мкм, в то время как в центральной образца размер зерна

несколько уменьшается. Это связано с тем, что ультразвук вызывает ряд эффектов при взаимодействии с дефектами структуры, и какой из этих эффектов будет преобладать, зависит как раз от исходной структуры материала. Воздействие УЗО способствует релаксации структуры, при которой дефекты выстраиваются в более равновесные конфигурации, что приводит к снижению внутренних напряжений для наиболее упрочненных поверхностных слоев заготовки. Это, в свою очередь, влияет на структурные свойства, что и наблюдается в эксперименте. При амплитудах УЗК, превышающих пороговое значение, происходит размножение дислокаций, и ультразвук оказывает упрочняющее действие на центральные слои заготовки, вызывая тем самым некоторое уменьшение размера зерна [3].

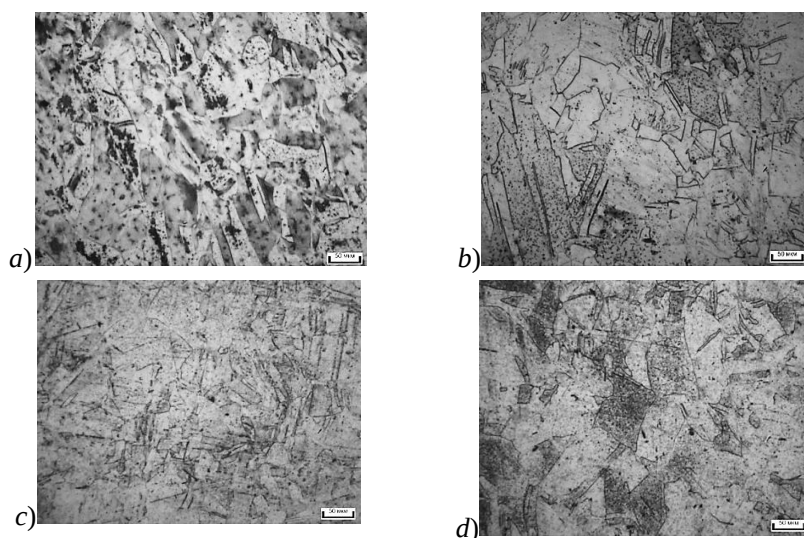


Рис. 1. Микроструктура образцов меди у края поверхности (a, c) и в центре (b, d), x100:
a, b – без УЗО;
c, d – УЗО 70 МПа

Полученные образцы после УЗО были исследованы методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC 214 Polyma. Показано, что в сплаве Л63 после УЗО наблюдается смещение пиков в сторону более высоких температур.

УЗО при 40 МПа приводит к снижению микротвердости по всему сечению, причем максимальное снижение наблюдается в центральной части образцов и составляет около 7%, после УЗО при 85 МПа наблюдается снижение микротвердости меди и латуни соответственно на 6 % и 4.5 % по сравнению с образцами после РСП без УЗО.

Установлена связь параметров ультразвукового воздействия с микроструктурой и физико-механическими свойствами УМЗ образцов меди и латуни. Показано, что ультразвуковое воздействие на материалы после радиально-сдвиговой прокатки при определенных амплитудах механических напряжений способствует релаксации неравновесной структуры границ зерен и снятию, таким образом, внутренних напряжений.

1. Влияние радиально-сдвиговой прокатки на микроструктуру и механические свойства нержавеющей аустенитной стали 08X18H10T / А.Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев, Е. А. Панин, А. С. Арбуз // Черная металлургия. –2020 – Т. 76 – № 2 – С. 162–168.
2. Role of Pre-Heat Treatment in the Formation of a Favorable Finegrained Structure in Copper and Brass for Further Deformation /A.Naizabekov, I.Volokitina, E.Panin, V.Rubanik, Y.Tsarenko// Journal of Chemical Technology and Metallurgy, v. 58, N4, 2023, p.783-787.
3. Effect of Ultrasonic Treatment on the Microstructure and Properties of Nanostructured Nickel Processed by High Pressure Torsion/ A.A. Nazarova, R.R. Mulyukov, Yu.V. Tsarenko, V.V. Rubanik, A.A. Nazarov// Materials Science Forum. - 2011.- V. 667-669. - P. 605-609.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ КОЛЁСНОЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Пенкин А.Г.*, Банных И.О., Минина Н.А., Теплов А.О.

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Россия

* alexgpenkin@gmail.com

В работе исследованы механизмы деформации и разрушения при статическом растяжении образцов колесной стали К3, используемой при изготовлении колёсных пар и элементов конструкции вагонных тележек РЖД, в бездефектном состоянии и с концентратором напряжения в виде усталостной трещины, с применением метода акустико-эмиссионной диагностики и фракто-графического анализа поверхности разрушения.

Материалом исследования служила конструкционная колесная сталь К3 (по ГОСТ 10791-2011 состав масс. %: С 0,58-0,67; Si 0,22-0,45; Mn 0,5-0,9; V 0,08-0,15; S < 0,020; P < 0,030) в состоянии поставки.

Исследование механизмов разрушения стали проведено на плоских образцах двух типов: образцах в виде двойной лопатки с рабочей частью 50x10x5 мм без концентратора напряжения, и образцах с концентратором напряжений в виде усталостной трещины общей длиной 10 мм. Усталостную трещину длиной 5 мм получали в процессе циклического нагружения с частотой 30 Гц посредством гидравлической машины Instron-8801. Статические испытания на растяжение проводили с применением малошумящей механической машины Instron-3382. Скорость деформации составляла $\dot{\epsilon}=1,6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ образцов без концентратора напряжения и 0,5 мм/мин образцов с концентратором напряжения.

Измерение акустико-эмиссионных параметров стали К3 в процессе статического растяжения образцов осуществляли посредством диагностической системы

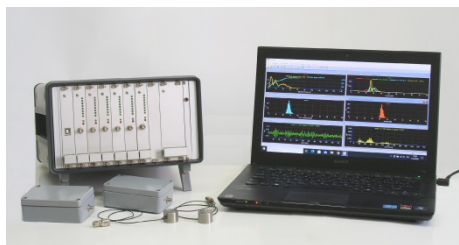


Рис. 1. Акустико-эмиссионная диагностическая система СДС1008

СДС1008 (рис.1), обеспечивающей многоканальную широкополосную цифровую регистрацию амплитудных, энергетических и спектральных характеристик сигналов АЭ в реальном времени [1].

Микроструктура исследованной стали К3 состояла преимущественно из перлитной составляющей со средним размером 20–35 мкм с прожилками феррита. Механические характеристики стали К3: $\sigma_{\text{в}} = 705 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{т}} = 396 \text{ МПа}$, $\delta = 21 \text{ \%}$.

Характер изменения параметров АЭ в процессе статического растяжения образца без концентратора коррелирует с основными стадиями деформации характерными для низкоуглеродистых и низколегированных сталей (рис.2,а) и на первой стадии, до момента образования шейки, представляет последовательность таких процессов, как микротекучесть (макроупругая область), текучесть (деформация Людерса–Чернова) и деформационное упрочнение [2].

Акустическая эмиссия в макроупругой области и на площадке текучести характеризуется высокой активностью $\dot{N}$ и большим количеством АЭ сигналов N, с преобладанием импульсов с энергией 32–45 дБ. В распределении спектральной плотности напряжения регистрируемых сигналов АЭ, охватывающем широкий частотный диапазон 50–1200 кГц, преобладают высокочастотные компоненты, при этом максимум наблюдается в районе частот 700–800 кГц. Стадия деформационного упрочнения и пластического течения материала, характеризуется снижением общего

уровня акустической эмиссии: снижением и активности АЭ, и средней амплитуды, и энергии сигналов. Стадия локализации деформации с образованием «шейки» и разрушение образца, отличается небольшим количеством сигналов АЭ, но обладающих предельно высокой амплитудой и энергией, что обусловлено существенным ускорением процесса образования и развития микротрещин в зоне локализации деформации, а также прохождением магистральной трещины.

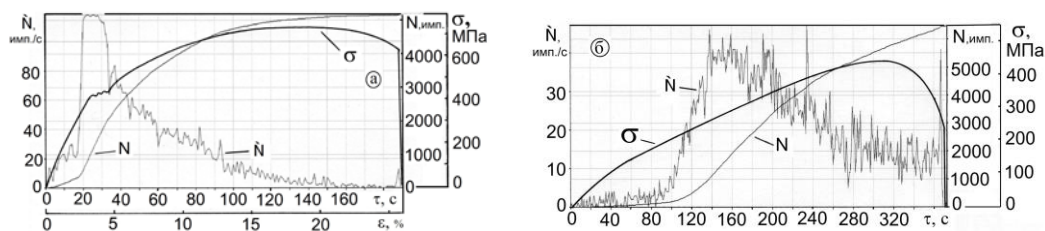


Рис. 2. Диаграммы изменение активности акустической эмиссии $\dot{N}$ (количество событий в секунду) и общего числа событий АЭ N в зависимости от степени деформации ϵ , совмещённые с диаграммой нагружения $\sigma(\epsilon)$ при растяжении образца без концентратора напряжения (а) и с концентратором напряжения в виде усталостной трещины (б)

Процесс деформации и разрушения образца стали с концентратором напряжения, в виде усталостной трещины, включает три основные стадии: стадия стабильного роста трещины, стадия ускоренного роста и стадия формирования магистральной трещины с доломом образца. Характер и кинетика изменения акустико-эмиссионных параметров, зарегистрированных в процессе статических испытаний на растяжение, хорошо коррелирует с результатами фрактографического анализа поверхности разрушения образца. Стадия стабильного роста трещины характеризуется низкой активностью АЭ, когда регистрируется незначительное число одиночных импульсов, при этом, кривая накопления сигналов АЭ $N(\tau)$ на этом участке имеет практически постоянный наклон (рис.2,б), что отражает равномерное продвижение первичной усталостной трещины. Стадия ускоренного роста трещины, сопровождаемая деформационным упрочнением и пластическим течением материала, находящегося в зоне надреза, характеризуется резким повышением активности АЭ, с прохождением максимума и последующим снижением к концу второй стадии. Третья стадия деформирования, как и в случае образца без надреза, характеризуется небольшим количеством сигналов АЭ, но обладающих предельно высокой амплитудой и энергией, обусловленных ускорением процесса зарождения и развития микротрещин в зоне локализации деформации и прохождением магистральной трещины. В работе показаны основные закономерности развития АЭ стали К3 в процессе текучести, пластической деформации и деформационного упрочнения, а также зарождения и развития магистральной трещины; установлена корреляция характера разрушения материала с параметрами акустической эмиссии образцов стали без дефектов и с искусственно выращенной усталостной трещиной. Показано, как комплекс акустико-эмиссионных параметров материала: амплитудный и энергетический спектры, распределение спектральной плотности напряжения импульсов АЭ и другие характеристики, позволяет на ранних стадиях деформирования выявлять трещины, зародившиеся под воздействием многократных циклических нагрузок, уровень которых значительно ниже предела прочности, а также контролировать их развитие.

1. Пенкин А.Г., Банных И.О., Минина Н.А., Теплов А.О. Исследование механизмов разрушения стали 09Г2С методом акустической эмиссии. // Металлы. 2023, №3. С.78 - 85.
2. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. 485 с.

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОПОР КАЧЕНИЯ

Короткевич С.В.

*«Инженерный центр» филиал РУП «Гомельэнерго», Гомель,
Республика Беларусь
korotsy@tut.by*

Источником сигнала акустической эмиссии (АЭ) является зарождение и эволюция дефектов структуры металла при внешнем воздействии нагрузочно-скоростных параметров и внешней агрессивной среды [1]. Чем меньше “шумит” подшипник при нагружении, тем выше качество его производства и сборки. Метод ферромагнитного резонанса (ФМР) позволяет по уширению линии ФМР отслеживать упрочнение поверхности ферромагнетиков и достижение критических уровней плотности дислокаций, после которых начинается процесс лепесткового, или наиболее опасного с инженерной точки зрения, селективного разрушения. Данный метод неразрушающего контроля сложен и трудоёмок в технической реализации в реальных узлах трения. Недостатком данных методов АЭ и ФМР является то, что дефекты на поверхностях металлов уже появились и эволюционируют. Метод электрофизического зондирования более простой в технической реализации и позволяет в режиме текущего времени на ранней стадии, до появления дефектов на поверхности металлов, прогнозировать и управлять режимами эксплуатации опоры качения (или скольжения) по состоянию граничного смазочного слоя (ГСС) и поверхностей сопряжённых металлов. К недостаткам всех перечисленных методов неразрушающего контроля является то, что на них не существует ГОСТ.

Объектом исследования являлись подшипники качения различного производства: 1–АПП 6203RS (производства КНР и представленного в РФ торговой маркой «АПП групп»); 2 – 6-180203 C17 (производства КНР и представленного в РФ торговой маркой «ГПЗ»); 3 – 6202-2RS d16 C3 (Perfect industries, inc. Florida, США), 4 – ZVL 6302/16 (Словакия).

На разработанном стенде, при упорно-радиальной схеме нагружения опоры качения, были исследованы подшипники в состоянии заводской поставки и с искусственно созданными дефектами. Установлено, что при ступенчатом радиально-упорном нагружении вращающихся подшипников среднее значение контактного сопротивления у подшипников 3, 4 на один-два порядка выше по сравнению с подшипниками 1, 2 (рис. 1).

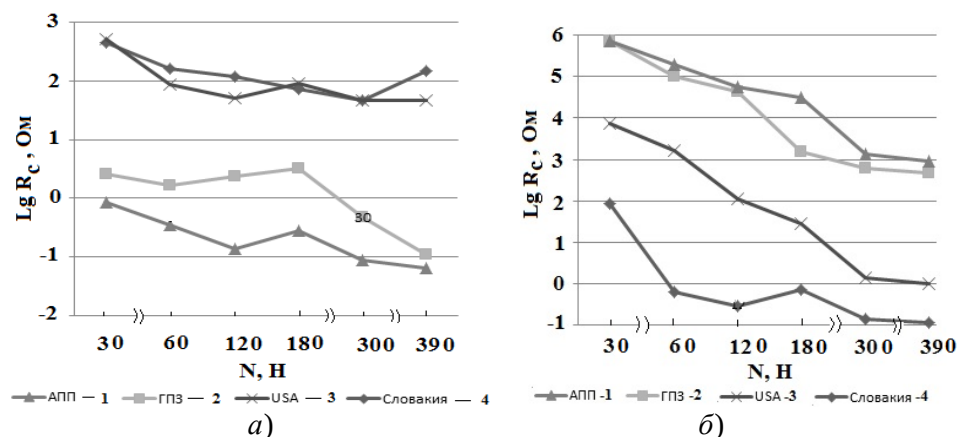


Рис. 1. Зависимость контактного сопротивления от нагрузки:
а – подшипники без дефектов; б – подшипники с дефектами.

Значения контактного сопротивления определяются площадью фактического контакта сопряжённых тел, которая, в свою очередь, зависит от их твёрдости и шероховатости, т. е. от способа обработки поверхности (цементирование, азотирование и т.д.) и финишной технологии обработки поверхности.

Использование в измерительном канале широкополосного фильтра в диапазоне частот 100 кГц – 1,5 МГц сигнала АЭ позволяет регистрировать кинетику формирования и эволюцию развития трещин при динамическом нагружении вращающегося подшипника качения. Анализ подшипников в состоянии заводской поставки показывает, что при увеличении нагрузки средний уровень сигнала АЭ увеличивается в 3–6 и более раз (рис. 2).

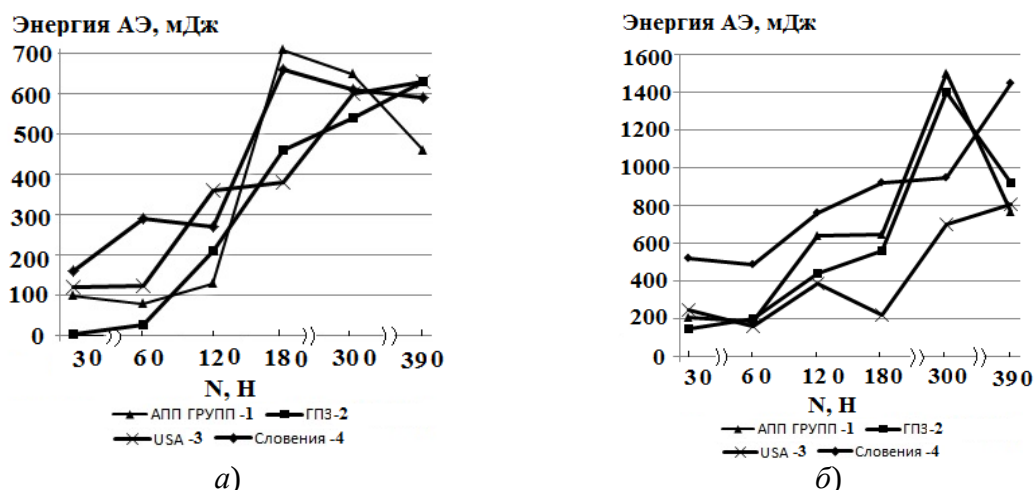


Рис. 2. Зависимость энергии сигнала АЭ от нагрузки:
а – подшипники без дефектов; б – подшипники с дефектами

Необходимо отметить, что в области номинальных нагрузок (6–18 Н) значения интенсивности АЭ и её флуктуации для подшипника 3 в 2–3 раза ниже по сравнению с остальными подшипниками, что свидетельствует об организации более высокого технологического качества производства [2].

Заключение. Анализ полученных результатов, представленных на рис. 1 и 2 показывает, что чувствительность метода электрофизического зондирования выше (значения изменяются на три-пять порядков) по сравнению с методом АЭ (значения изменяются в четыре–шесть раз), что очевидно связано с более высокой разрешающей способности данного метода к изменению состояния поверхности металлов. Очевидно, что в соответствии с энергетической выгодностью и принципом наименьшего действия, поверхности металла необходимо затратить меньше энергии на переход от физической адсорбции к хемосорбции ГСС, чем на формирование дефектов, что она и реализует. Таким образом, использование метода электрофизического зондирования позволяет своевременно осуществлять не только входной контроль, но и контролировать наступление критических режимов эксплуатации подшипников качения.

1. Поллюк А. Акустико-эмиссионный контроль. – Металлы (Metals Handbook) / А. Поллюк. – Т. 17. – ASM International. – 1989. – С.278–294.
2. Короткевич С.В., Пинчук В.Г., Кравченко В.В. Диагностика опор качения и скольжения по состоянию поверхности раздела сопряжённых тел физическими методами // Saagbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. – 267 с.

ИННОВАЦИОННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСПЫЛИТЕЛИ

Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Генне Д.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А.

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

sergey@bti.secna.ru

Ультразвуковое распыление является перспективной технологией, позволяющей эффективно формировать аэрозоли с узким распределением частиц по размерам и заданной производительностью. Основное преимущество метода заключается в возможности увеличения межфазной поверхности при минимальных энергетических затратах, что критически важно для повышения эффективности различных технологических процессов. Применение ультразвукового распыления находит широкое использование в таких областях, как сушка и увлажнение материалов, термообработка, горение топливных эмульсий, каталитические процессы, осаждение наночастиц, а также распыление биологических жидкостей и лекарственных препаратов [1].

Авторами разработаны конструкции ультразвуковых распылителей, обеспечивающих распыление в слое жидкости на колеблющейся поверхности. Эти устройства включают в себя пьезоэлектрические колебательные системы, обеспечивающие эффективную передачу энергии к распыляемой жидкости и образование аэрозольных частиц заданного размера. В частности, разработаны и рекомендованы для практического применения различные по конструктивному исполнению ультразвуковые распылители, представленные на рисунке 1.

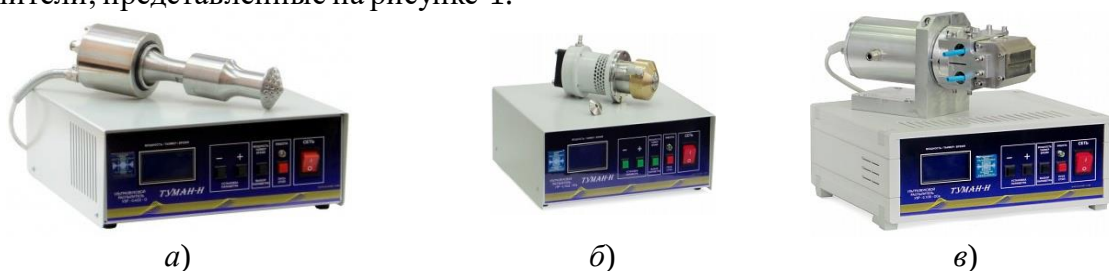


Рис. 1. Ультразвуковые распылители: а) высокопроизводительные крупнодисперсные; б) с системой генерации воздушного потока; в) для формирования факела распыления произвольной формы (например, плоского)

Созданные распылители с рабочей частотой 22 кГц обеспечивают формирование капель размером 65 мкм с производительностью в несколько литров в минуту при мощности до 150 Вт. Высокочастотные распылители, работающие на частоте 160 кГц, формируют более мелкие капли (18 мкм), однако их производительность существенно ниже — не более 1 мл/с. Варианты конструкций с воздушным потоком позволяют контролировать форму факела распыла и направленность аэрозольного потока, что особенно важно при применении в системах осаждения и термообработки материалов.

Кроме традиционных пьезоэлектрических распылителей, предложены и разработаны два инновационных устройства формирования аэрозолей: многостадийный ультразвуковой распылитель и акусто-гидравлический (кавитационный) распылитель, показанные на рисунке 2. Многостадийный метод основан на последовательном разрушении крупных капель жидкости в поле стоячей ультразвуковой волны [2]. Первоначально жидкость распыляется любым из доступных методов (гидравлическое или ультразвуковое распыление), после чего образовавшиеся капли поступают в область интенсивного ультразвукового воздействия, где они многократно дробятся.

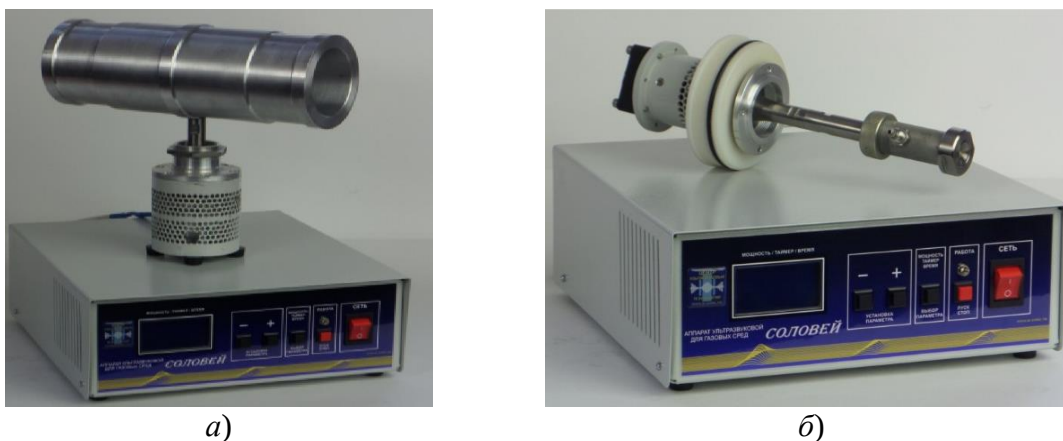


Рис. 2. Инновационные ультразвуковые распылители: а) многостадийный распылитель; б) акусто-гидравлический распылитель

В разработанном устройстве с трубчатым ультразвуковым излучателем (частота 22,4 кГц) звуковое давление достигает 190 дБ, что обеспечивает ступенчатое разрушение капель на трех последовательных стадиях. Экспериментально установлено, что изменение уровня акустического давления в диапазоне 160–182 дБ позволяет варьировать средний размер частиц от 170 мкм до 37 мкм, что делает метод универсальным для различных применений.

Акусто-гидравлический распылитель использует эффект кавитации вблизи сопла для интенсификации процесса диспергирования жидкости [3]. При подаче жидкости под давлением в 2–12 атм кавитационные пузырьки внутри капель схлопываются, вызывая их дополнительное дробление. Установлено, что при увеличении давления до 11 атм и амплитуды ультразвуковых колебаний до 47 мкм формируется аэрозоль с размером частиц менее 30 мкм при производительности до 15 мл/с.

Результаты проведенных исследований подтверждают высокую эффективность созданных устройств, реализующих технологии ультразвукового распыления и перспективность реализации комбинированных технологий для формирования аэрозолей с контролируемыми параметрами. Предложенные и разработанные устройства могут найти применение в системах очистки, диспергировании лекарственных препаратов и других технологических областях, где требуется точный контроль размеров и распределения частиц в аэрозоле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875/>

1. Ливанский А.Н., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Ультразвуковая обработка дисперсных систем. Вестник машиностроения. 2017. № 9. С. 62–68.
2. Кудряшова О.Б., Шалунов А.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А. Математическая модель процесса многостадийного дробления капель в ультразвуковом поле. Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98. № 2. С. 525–534.
3. Шалунов А.В., Нестеров В.А., Генне Д.В., Терентьев С.А. Акусто-гидравлический способ диспергирования жидкостей. Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2023): Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Бийск, 26–27 октября 2023 года. Бийск: АлтГТУ. 2023. С. 92–94.

ОБ ОБРАТНОВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТАХ В НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКЕ И РАДИОФИЗИКЕ

Бырдин В.М., Пузакина А.К.

Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

V_M_Byrdin@mail.ru

1. Введение. Обратные волны были открыты в механике в 1904 г. английским математиком Гораком Лэмбом (H. Lamb, 1849–1934). Лэмб широко известен, прежде всего, анализом нормальных волн в пластине, «волнами Лэмба» и книгами «Гидромеханика» (М.-Л., 1947; англ. изд. 1895) и «Динамическая теория звука» (М., 1960; англ. 1910). В открытии обратных волн (ОВ) указываются также немецко-англ. физик Артур Шустер (A. Schuster, 1851–1934), и акад. Л. И. Мандельштам (1879–1944) [1–5 и др.]. В целом за 120-тилетнюю историю определяющий вклад в физическую теорию обратных волн внесли наши отечественные радиофизики и акустики Веселаго В. Г., Малюжинец Г. Д., Шевченко В. В. и другие. Также и основное приложение – обратноволновая радиоэлектроника была заложена в 1950-ые гг. трудами советских, американских и французских учёных.

В силу фундаментального свойства *адирекции* – противоположности фазовой и групповой скоростей, ОВ обладают целым рядом уникальных явлений и свойств. Среди которых: обратный эффект Доплера, отрицательное преломление, антизеркальное отражение, фокусировка при разноимённом [4] преломлении и отражении, узкополосный частотный спектр, селективно-спектральное затухание и мн. др., а также несколько нелинейных явлений – о чём наш доклад.

2. О нелинейных ОВ-явлениях и перспективах технологий

2.1. Сводка нелинейных ОВ-эффектов [2,3 и др.]. 1) *Генерация* гармоник при сверхфокусировке; излучение квази-сферической (цилиндрич.) 2-ой, 3 и др. гармоник. 2) *Инверсия* волнового синхронизма при нелинейном взаимодействии с обратной волной. 3) *Адирективное* (противоположное) излучение нелинейно генерируемых, разноимённых гармоник и мод. 4) *Отрицательный* кинетический импульс (электродинамическое и механическое представление). 5) *Световое* притяжение. 6) *Притяжение* упругими и звуковыми обратными волнами. В частности, ультразвуковой и гидродинамический антифонтан и воронка. 7-8) *Приливные*, акустические и гидродинамические ОВ-ые течения – гипотеза автора (ВБ). 9) *Инверсная* левитация (гипотеза) и передвижение тел (факт). 10-11) *Инверсная* пондеромоторика обратного света и звука: волновое увлечение (в отл. от отдачи), обращённый эффект Садовского и др. гипотезы пондеромоторики. 12) *Отрицательные* моменты углового и кинетич. импульсов – гипотеза. 13) *Аномальность* вынужденного комбинационного рассеяния [2].

2.2. Генерация при разноимённой фокусировке. В электродинамике добились бо́льших успехов по ОВ-носителям, чем в механике и акустике. Однако, ОВ-моды Лэмба удобный инструмент по физике и моделированию. Поставим *краевую задачу 1*: Пусть на торец пластины падает расходящаяся гармоническая ОВ S_1^0 ($A_p r^{-0.5} \sin(ikr - i\omega t)$ – асимптотика точного решения, для ближней зоны функция Ганкеля). Волна строго цилиндрического фронта. Пласт состыкован с жидким слоем с абсолютно жёсткими (или мягкими) стенками – рис. 1а. Скорость звука в жидкости достаточно высока для равенства скоростей нормальных мод в жидкости и падающей ОВ, которая высока. Схема решения на нашей базе [см. в 3,4]. В линейном приближении получим отражение лэмбовского спектра и преломление в сходящиеся моды жидкого слоя с фокусировкой. Все моды в жидкости слабо сходящиеся, кроме равноскоростной с $C_G = C_{S01}|\omega_0$, дающей точечный фокус – в мнимом стоке-

источнике [1,4]. Мнимый и с пересечением лучей – рис. 2. Второе и последующее приближения гипотетически дадут 2ую и др., слабо интенсивные гармоники собственных мод жидкого слоя.

В электродинамике простота формализма и *супер-линза В. Г. Веселаго*, широта др. моделей и экспериментов и бум работ [1–6 и мн. др.]. ...В фокусе солнечных лучей загорается сухая трава, а что при суперлинзе Веселаго? В своей пионерской *пронобелевской* статье (УФН-1967) и позже Веселаго Г. В. не рассматривал эту проблему. Физически очевидно, что в фокусе, тем более в супер-фокусе весьма и крайне высокая интенсивность поля – отсюда нелинейные, диссипативные и тепловые эффекты. Нелинейные явления при ОВ-фокусировке, рассматривались нами с 2002г [3,4]. На данное время анализ качественный гипотетический, как и многое в теории ОВ (у Веселаго Г. В. и у др. авторов).

Задача 2 – рис. 2. Пусть из фононного кристалла на жидкость падает сферич. ОВ. Скорости звука в кристалле и в жидкости равны.

Тогда получим суперфокус J_M с излучением сферич. гармоник в жидкости: $A_2 r^{-2} \exp i(k(2\omega)r - 2\omega t)$, $A_3 r^{-3} \exp i(k(3\omega)r - 3\omega t)$, ..., $A_P \gg A_2 \gg A_3 \dots$

2.3. Генерация при нелинейном разномёрном взаимодействии плоских волн. Нелинейную *плоско-волновую* ОВ-физику, по-видимому, впервые рассмотрел В. М. Агранович, 2004. И за два десятилетия известно множество работ в электродинамике, а также и в фофонике [2 и мн. др.], у нас и за рубежом. Несколько наших точных задач [3,4] послужат 1ым приближением для нелинейных задач.

2.4. О перспективах технологий (готовится обзор).

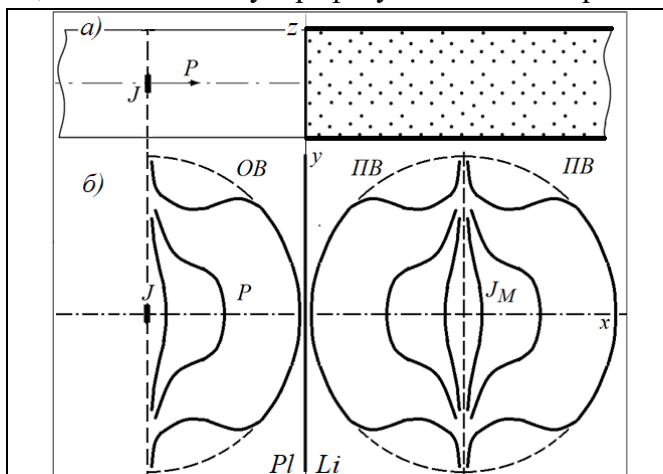


Рис. 1. Схема двух проекций в задаче 1.
а) стык пластины с жидким слоем (Plate; Liquid).
б) падение ОВ гауссова фронта, преломление со сверхфокусировкой (линии точных изофаз [4])

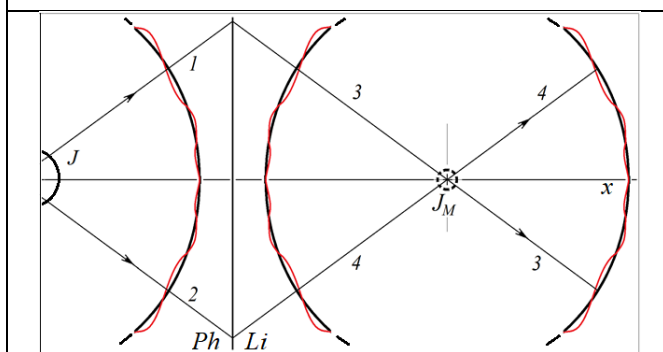


Рис. 2. Схема фокусировки на стыке фононного кристалла с жидкостью

1. Шевченко В.В. Локализация стационарного электромагнитного поля при помощи плоской границы метаматериала // УФН. 2011. Т. 181. № 11. С. 1171–1182.
2. Агранович В.М., Гартштейн Ю.Н. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света (обзор) // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1051 – 1068.
3. Бырдин В.М. Дифракция нормальных волн в пластине, погруженной в жидкость: Модель уровнемера, ...// Изв. РАН, МТТ. 2017. № 3. С. 83-99.
4. Бырдин В.М. Элементы ОВ-ой разномёрной анти-дифракции & Гауссов пучок, дифракция ...// Акуст. Семинар им. Д.П. Коузова. СПб, 01.2023. 74 сл.+ 214 п. лит.
5. Слюсар, Вадим. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2009. № 7. С. 70–79. (укр.).
6. Metamaterials'2022. The 16th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena. Siena, Italy, Sept. 2022.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА МА2 ПОСЛЕ РКУП И ПОСТДЕФОРМАЦИОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Сементеева Ю.Р.^{1,2}, Аксенов Д.А.¹, Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Шишкунова М.А.^{1,2},
Рааб А.Г.¹

¹ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

yu.nuriewa@yandex.ru

Металл-воздушные батареи представляют собой перспективные источники энергии благодаря своей высокой удельной мощности, экологичности и теоретической энергоемкости. В таких батареях используют активные металлы в качестве анодов, кислородно-диффузионный катод и электролит, которые соединены между собой [1]. Магний, является одним из наиболее перспективных материалов для анодов в металл-воздушных батареях благодаря более отрицательному электродному потенциалу (-2,37 В по сравнению со стандартным водородным электродом), чем у цинка (-0,763 В) и алюминия (-1,663 В). Магниевый сплав в качестве анода может обеспечить более сильную электрохимическую движущую силу для разрядной активности [2] и также обладает высокой фарадеевской емкостью ($2,2 \text{ А} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$) [3]. Однако широкое применение магний-воздушных батарей ограничено рядом проблем, связанных с поляризацией магниевых анодов и низкой анодной эффективности [4,5].

Для преодоления этих проблем применяются различные подходы, включая легирование магниевых сплавов элементами, такими как Al, Zn, In, Mn, Ga, Pb и редкоземельные элементы [6]. Одним из наиболее важных легирующих элементов для Mg является Al, поскольку его добавление приводит к улучшению литейных свойств, к повышению прочности при сжатии и усталости, а также восстанавливает активность анода и снижает саморазряд. Коммерческие сплавы системы Mg-Al-Zn (AZ) получили широкое внимание в качестве анодов благодаря простоте промышленного производства, относительной дешевизны, хорошим разрядным характеристикам и экологичности [7].

Кроме того, для улучшения разрядных характеристик магниевых анодов применяются методы пластической деформации, такие как экструзия и прокатка, которые позволяют уменьшить размер зерен и повысить активность анода [8]. При этом традиционные методы пластической обработки не позволяют достичь ультрамелкозернистого состояния для магниевых сплавов (менее 1 мкм) из-за малого числа плоскостей скольжения в гексагональной структуре магния [3, 9]. Деформированное состояние является сильно неравновесным и одним из способов совершенствования структуры является объемная ультразвуковая обработка. Как было показано в работе [10], ультразвук эффективно воздействует на дислокационную структуру металла, при этом в отличие от термообработки не приводит к росту зерна. В работе [11] уже было установлено положительное влияние ультразвуковой обработки на повышение коррозионной стойкости в соляной кислоте.

В данной работе исследовались разрядные характеристики промышленного магниевых сплава МА2 (российский аналог сплава AZ31) в электролите NaCl с концентрацией 3.5%. В качестве анода использовали образцы после промышленной горячей прокатки, образцы, полученные комбинированным методом деформации, включающим экструзию и равноканальное угловое прессование (РКУП) и образец после постдеформационной ультразвуковой обработки [11]. Испытания проводились в электрохимической ячейке на потенциостате в гальваностатическом режиме при плотности тока $2,5 \text{ мА/см}^2$. Результаты показывают, что комбинированная деформационная обработка сплава Mg-Al-Zn экструзией и РКУП при 350°C одновременно приводит к измельчению структуры с размером зерен 10-20 мкм и появлению рекри-

сталлизованных зерен размером 1-2 мкм. Следует отметить, что комбинированная деформационная обработка формирует структуру с высокой долей высокоугловых границ, около 72%, в то время как дальнейшая УЗО приводит к дальнейшему увеличению доли высокоугловых границ до 89%. По результатам работы можно отметить, что анодные свойства проявляются лучше у образца после деформационной обработки РКУП, измельчение зерна и снижение плотности дислокаций приводит к более отрицательному разрядному потенциалу (-1,540 В) наряду с более высокой анодной эффективностью (65%) по сравнению с другими образцами.

Таблица 1. Разрядные характеристики

Состояние	Среднее потенциал разряда, мВ	Анодная эффективность, %
Исходное	-1523,46	57,5
Экструзия-РКУП	-1540,64	65,4
Экструзия-РКУП+УЗО	-1346,65	54,7

1. Y. Li, J. Lu, Metal-air batteries: will they be the future electrochemical energy storage device of choice? *ACS Energy Lett* 2 (2017) 1370e1377, <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.7b00119>.
2. L. Ma, Y. Zhang, C. Qin, F. Ren, G. Wang, Effects of polystyrene sulfonate/ graphene and Mn3O4/graphene on property of aluminum (zinc)-air batteries, *Int. J. Hydrogen Energy* 23 (2020) 13025e13034, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.222>.
3. N. Wang , W. Li , Y. Huang , G. Wu , M. Hu , G. Li , Z. Shi , Wrought Mg-Al-Pb-RE alloy strips as the anodes for Mg-air batteries, *J. Power Sources* 436 (2019) 226855
4. T. Zhang, Z. Tao, J. Chen, Magnesium-air batteries: from principle to application, *Mater. Horiz.* 1 (2014) 196e206, <https://doi.org/10.1039/c3mh00059a>.
5. X. Liu , J. Xue , P. Zhang , Z. Wang , Effects of the combinative Ca, Sm and La additions on the electrochemical behaviors and discharge performance of the as-extruded AZ91 anodes for Mg-air batteries, *J. Power Sources* 414 (2019) 174–182.
6. N. Wang , R. Wang , C. Peng , B. Peng , Discharge behaviour of Mg-Al-Pb and Mg-Al-Pb-In alloys as anodes for Mg-air battery, *Electrochim. Acta* 149 (2014) 193–205.
7. H. Zhu, Electrochemical performance of Mg-Al-Zn and Mg-Al-Zn-Ce alloys as anodes for Mg-air battery, *Int. J. Electrochem. Sci.* (2018) 11180e11192, <https://doi.org/10.20964/2018.11.89>.
8. X. Liu , S. Liu , J. Xue , Discharge performance of the magnesium anodes with different phase constitutions for Mg-air batteries, *J. Power Sources* 396 (2018) 667–674.
9. G.-L. Song , Z. Xu , Effect of microstructure evolution on corrosion of different crystal surfaces of AZ31 Mg alloy in a chloride containing solution, *Corros. Sci.* 54 (2012) 97–105.
10. Nazarov, A. A., Murzinova, M. A., Mukhametgalina, A. A., & Shayakhmetova, E. R. (2023). Bulk Ultrasonic Treatment of Crystalline Materials. *Metals*, 13(2), 344. <https://doi.org/10.3390/met13020344>.
11. Aksenov, D. A., Nazarov, A. A., Raab, G. I., Raab, A. G., Fakhretdinova, E. I., Asfandiyarov, R. N., Shishkunova, M. A., & Sementeeva, Y. R. (2022). Effects of Severe Plastic Deformation and Ultrasonic Treatment on the Structure, Strength, and Corrosion Resistance of Mg-Al-Zn Alloy. *Materials*, 15(20), 7200. <https://doi.org/10.3390/ma15207200>.

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФЛИП-ЧИП

Войтюк Д.М., Россоловский А.Ю., Тычинская И.Д., Петухов И.Б.

ОАО «Планар-СО», Минск, Республика Беларусь
petuchov@kbtem.by

Резюме

Рассмотрены результаты монтажа кристалла в корпус по технологии флип-чип, технические проблемы, возникающие в процессе проектирования сборочного оборудования и технологические аспекты монтажа.

Ключевые слова: технологический процесс, технология флип-чип, ультразвуковой преобразователь, объемные выводы, инструмент монтажа.

Материалы и методы

Монтаж кристалла по технологии флип-чип используется для создания изделий микроэлектроники по принципу присоединения полупроводникового кристалла интегральной схемы (ИС) в корпус активной стороной вниз при помощи объемных выводов на контактных площадках (бампов) к контактным площадкам корпуса. Данная технология по сравнению с проволочным монтажом позволила уменьшить размеры кристалла, уменьшить омическое сопротивление, сократив площадь вывода, также увеличить производительность процесса монтажа [1]. Создание электропроводящего соединения по технологии флип-чип может быть реализовано нанесением припойных выводов на основе припоя, металлов, токопроводящих клеев.

Разработанная установка монтажа методом флип-чип на ОАО «Планар-СО» [2], реализующая термозвуковой способ соединения при помощи УЗ-генератора частотой 66 ± 4 кГц мощностью до 60 Вт, преобразователя с пьезокерамическим излучателем на основе ЦТС19, обеспечила получение необходимых амплитуд УЗ-колебаний. При этом была реализована функция совмещения кристалла за счёт полупрозрачного зеркала, при помощи которого оператор, используя ручки регулировки координат столика, мог в ручном режиме выполнить совмещение кристалла и корпуса. Для обеспечения перпендикулярности при посадке использовалась тонкая фольга, на которой делается отпечаток инструмента. Отпечаток должен иметь четкий контур торца инструмента. Выставление параллельности относительно подложки осуществляется регулировкой столика. Недостатком данного метода является длительность процесса монтажа, монотонность в работе оператора, которая может привести к браку, необходимость точного выравнивания и тщательного контроля процесса монтажа.

Автоматизация монтажа кристаллов по технологии флип-чип представляет особый интерес с точки зрения технической реализации в сочетании со сложностью оптимизации технологического процесса для каждого типа ИС. Сложность технической составляющей заключается в реализации совмещения контактных зон кристалла и корпуса с заданной точностью, обеспечении равномерности присоединения каждого бампа, значение которых может варьироваться от 6 до 50 и более, в составе одного кристалла, размерами от 0,75 мм и более, стабилизации нагружения на рабочий инструмент и поддержание температуры в рабочей зоне.

Экспериментальные результаты

Экспериментальная установка ЭМ-4615 ОАО «Планар-СО», предназначенная для автоматического термозвукового монтажа кристалла в корпус реализует выше перечисленные требования.

Технологический процесс, реализуемый на установке ЭМ-4615, заключается в снятии кристалла с пластины диаметром до 200 мм, автоматическом перевороте кристалла с функцией ориентации кристалла и последующей установкой его в корпус. Ультразвуковой преобразователь в составе сварочной головки представлен на рисунке 1.

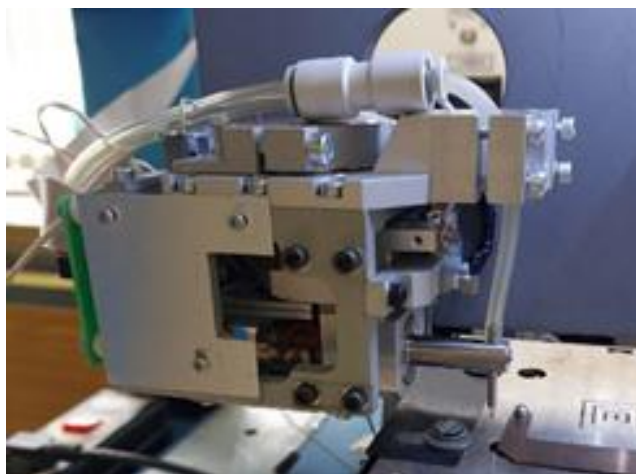


Рис. 1. Головка сварочная

В ходе проведения экспериментального монтажа кристалла в корпус были применены технологические режимы, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Технологические режимы

Время, мс	Подводимое напряжение к УЗ преобразователю, В	Усилие, г	Температура, °С
51–190	6,4–23	170–250	160–195

В ходе экспериментального монтажа были смонтированы более 40 кристаллов. Исследование ИС после монтажа было выполнено разрушающим контролем на сдвиг, с исследованием контактных площадок под микроскопом, что позволило сделать заключение о качестве присоединения.

Выводы

Изучения результатов разрушающего контроля на сдвиг и микроанализ контактных площадок показали наличие прожига металлизации при использовании подводимого напряжения к ультразвуковому преобразователю выше 17 В в сочетании с временем воздействия 50 мс, в результате оптимизации технологических режимов была достигнута адгезия между кристаллом и корпусом до 250 г с сохранением качественного покрытия металлизации на кристалле.

1. Oliver Kieler Development of flip-chip technology for the optical drive of superconducting circuits электронный доступ <https://doi.org/10.12688/openreseurope.17481.1>) Latest Version Published: 29 Apr 2024, 4:97 (<https://doi.org/10.12688/openreseurope.17481.1>)
2. Ланин А. Технологические особенности монтажа Flip-Chip, Ланин А., Петухов И., Волкенштейн С., Барбарчук Д. // Силовая Электроника, 2010. № 4. С. 78-82.
3. А. Хохлун. Классификация основных технологий «флип-чип» для использования в современных системах в корпусе, А. Хохлун¹, С. Чигиринский, // Электроника, Модули и микроблоки, 2019. № 3. С. 175-179.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ ЛИСТОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

Блинова А.В., Богдан О.П., Муравьева О.В.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
Ижевск, Россия*
anna.tarasovaaa@mail.ru

Терморасширенный графит (ТРГ) представляет собой углеродный материал с червеобразной (вермикулярной) структурой, формируемой в результате его расширения в процессе нагревания до температуры 1150 °С в специальных печах. Особенность ТРГ заключается в высокопористой структуре, низкой плотности (200 – 2000 кг/м³) и высоких механических характеристиках, благодаря которым он нашел применение в различных областях промышленности, например, при производстве герметизирующих, теплоизолирующих и электропроводящих изделий. В настоящее время активно исследуются физические свойства ТРГ, в частности, такие как структура и ее изменение, теплостойкость и теплопроводность, коэффициент трения, износостойкость и магнитные свойства и др. Механические свойства ТРГ, в том числе упругие, исследуются преимущественно разрушающими методами контроля, которые могут их измерить, только в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что не позволяет определить их в других направлениях и оценить характер их изменения.

Целью работы является определение динамических упругих модулей образцов из ТРГ неразрушающим акустическим методом в различных направлениях относительно направления проката в процессе производства.

В основе разработанной методики лежит временной теневой метод акустического контроля, основанный на регистрации времени прохождения нормальных волн Лэмба, в исследуемых образцах с последующим расчетом скоростей их распространения (нулевой моды симметричной волны C_{S0} и нулевой симметричной моды SH-волны C_{SH}) и определении динамических упругих модулей [1]:

- модуля Юнга E	- модуля сдвига G	- коэффициента Пуассона ν
$E = C_{S0}^2 \cdot \rho(1 - \nu^2)$	$G = C_{SH}^2 \cdot \rho$	$\nu = (C_{S0}^2 - 2C_{SH}^2) \cdot C_{S0}^{-2}$

где ρ – плотность ТРГ. Методика измерения скоростей C_{SH} и C_{S0} акустических нормальных волн Лэмба описана в работах [1-2].

Методика определения динамических упругих модулей апробирована на четырех листах ТРГ с толщиной h в диапазоне 0,4–1,5 мм и плотностью ρ в диапазоне 850–970 кг/м³.

Учитывая, что листы ТРГ обладают анизотропией, измерение динамических упругих модулей выполнено в различных направлениях (рисунок 1) относительно направления проката. Согласно рис. 1а, зависимость коэффициента Пуассона ν от углового направления α распространения акустической волны носит параболический характер, достигая максимума по направлению проката и направлению вытянутости пор ($\alpha = 90^\circ$), и свидетельствует о сужения материала при продольном растяжении в данном направлении. При этом с уменьшением толщины образцов ТРГ наблюдается стремление коэффициента Пуассона ν к нулевому значению вдоль проката, что может говорить о снижении каких-либо поперечных изменений при продольном растяжении. В направлении поперек проката (0° и 180°) коэффициент Пуассона ν принимает отрицательное значение, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам, для которых характерно поперечное расширение при продольном растяжении. На рис. 1б представлено изменение модулей Юнга E и сдвига G от углового

направления α распространения акустической волны. Модуль Юнга E стремится к максимальному значению по направлению проката (90°) и уменьшается в направлении поперек проката (0° и 180°), модуль сдвига G имеет преимущественно линейный характер для каждого образца и не зависит от направления проката.

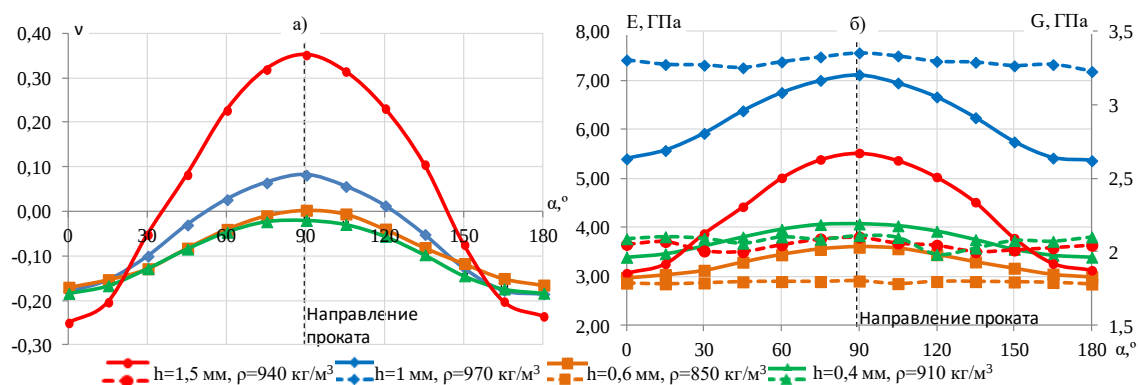


Рис. 1. Графики зависимости упругих модулей от углового направления распространения акустических волн: а) коэффициента Пуассона ν , б) модуля Юнга E (—) и модуля сдвига G (----)

Для подтверждения акустических свойств проведено экспериментальное исследование влияния растягивающей нагрузки (0,1-4,8 МПа) на изменение времени прохождения продольной волны [1] по толщине образца ТРГ $h = 1$ мм, с плотностью $\rho = 970$ кг/м³. Выявлено, что в направлении вдоль проката (90°) растягивающая нагрузка практически не оказывает влияния на изменение времени распространения продольной волны, и при нагрузке 4 МПа достигает $\Delta t = 4$ нс, что находится в пределах погрешности измерения. В направлении поперек проката (0° , 180°) увеличение растягивающей нагрузки приводит к возрастанию времени распространения продольной волны, и при 4 МПа достигает $\Delta t = 30$ нс. Выявленное увеличение времени распространения продольной волны по толщине листа ТРГ в процессе приложения к нему растягивающей нагрузки в этом же направлении, свидетельствует об увеличении толщины образца его при растяжении, что подтверждает отрицательный коэффициент Пуассона в направлении поперек проката, полученный при апробации разработанной методики определения динамических упругих модулей.

Вывод

Предложена методика определения динамических упругих модулей пористых материалов, на основе экспериментально измеренных в них скоростей нормальных волн Лэмба, апробированная на примере листов ТРГ, и которая позволяет исследовать упругие свойства и их анизотропию в различных направлениях по листу в пределах 180° не разрушая образец, а также подтвердить или опровергнуть принадлежность к акустикам различных материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZZN-2025-0003) и использованием уникальной научной установки «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

1. Муравьева О.В. Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита / О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов, О. П. Богдан // Приборы и методы измерений. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 213-230.
2. Богдан, О. П. Методы акустического контроля пористых материалов /О.П. Богдан, А.В. Блинова, Л. А. Денисов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 68-72.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ЗОНЕ СВАРКИ ПОЛИПРОПИЛЕНА ОТ СТАТИЧЕСКОГО УСИЛИЯ ПРИЖИМА РАБОЧЕГО ТОРЦА ВОЛНОВОДА-ИНСТРУМЕНТА К СВАРИВАЕМЫМ ДЕТАЛЯМ

Мурашкин С.В.¹, Селиванов А.С.¹, Спиридонов Н.Г.¹, Сидоров Д.А.²

¹ Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия
SV.Murashkin@yandex.ru, selivas@inbox.ru, spiridonov.nikol@yandex.ru

² АО «АВТОВАЗ», Тольятти, Россия
daniil.sidorov@vaz.ru

Аннотация

В работе представлены условия и результаты экспериментальных исследований контактной точечной ультразвуковой сварки полипропиленовых пластин. Получены статистические зависимости влияния усилия прижима на время действия ультразвука в зоне сварки и на среднюю скорость внедрения рабочего торца СИ в полипропилен. Проведен анализ этих зависимостей.

Введение

Прочность сварного соединения зависит от количества расплава, находящегося между прижатыми поверхностями свариваемых деталей [1]. Если количество расплава зафиксировать глубиной внедрения торца СИ в полимер, то производительность УЗС будет зависеть от времени действия ультразвука в зоне сварки, которое, в свою очередь, определяется значением усилия прижима рабочего торца СИ к свариваемым деталям.

Поэтому целью настоящего исследования является определение влияния усилия прижима на выходные показатели процесса УЗС: время действия ультразвука в зоне сварки, скорость внедрения рабочего торца СИ в полипропилен.

Методика исследования

1. Выполнение расчета диапазона исследуемого усилия прижима в зоне сварки. За основу расчета взято критическое давление под волноводом, при котором сминаются неровности (шероховатость) и нет сдвигов на контактной поверхности образцов и, поэтому, рост температуры на границе раздела происходит с той же скоростью, что и в объёме образца, для полипропилена равно 3 МПа [2, с. 129]. В результате определили диапазон от 7,845 Н до 86,229 Н, который разбили на 11 значений с шагом 7,845 Н. Таким образом получили для реализации усилий динамический ряд F_n : 7,845; 15,691; ...; 86,229 (1). Поэтому весь эксперимент состоял из 11 групп по 10 опытов в каждой.

2. Подготовка образцов и оборудования. Контактную точечную УЗС прямоугольных образцов-пластин (38x22x3 мм), изготовленных в количестве 220 штук из полипропилена 01003-26 ГОСТ 26996-1986, выполняли на универсально-фрезерном станке модели FHV-50PD, оснащённым комплексом УЗС пластмасс и специальной оснасткой. Комплекс состоит из устройства для УЗС пластмасс и ультразвукового цифрового генератора. Устройство содержит ультразвуковую колебательную систему механических продольных колебаний СИ. Рабочий торец СИ имеет вид цилиндрического двухступенчатого стержня. Диаметр первой ступени равен 6 мм, а её длина 3,7 мм. Диаметр второй ступени равен 10 мм. Усилие прижима в зоне сварки создавали рычажно-механической системой, а глубину внедрения рабочего торца СИ ограничивали расстоянием между электрическими контактами, равным 4 мм.

3. Схема УЗС - «внахлёт». Цикл УЗС - «статическое давление-ультразвук».

Цикл УЗС состоит из последовательного выполнения действий:

– приложение постоянного статического усилия, равного значению из ряда F_n ;

- выдержка в течении 3 с для сжатия образцов-пластин под усилием $F_{\text{п}}$;
- включение УЗ-колебаний (УЗК) с включением таймера отчёта времени T_{ui} ;
- выключение УЗК в момент внедрения торца СИ на глубину 4 мм;
- выдержка в течении 60 с образца-сварного соединения под усилием $F_{\text{п}}$;
- снятие статического усилия $F_{\text{п}}$.

4. Режим УЗС: выходная мощность генератора 420 ± 10 Вт, амплитуда и частота колебаний торца СИ, соответственно. 52 ± 3 мкм и 22915 ± 15 Гц.

5. Статистическая обработка результатов измерений T_{ui} в каждой группе выполнялась по ГОСТ 14359-1969. Для групп обозначения: T_{uc} – среднее время действия ультразвука, с; V_c – средняя скорость внедрения СИ в полимер, м/с. Тогда наблюдаемые и вычисляемые дискретные данные запишем в виде рядов:

$$T_{\text{uc}}: 12,20; 6,41; 5,33; 4,79; 4,11; 3,68; 3,21; 2,99; 2,85; 2,88; 2,79. \quad (2)$$

$$V_c: 0,33; 0,62; 0,75; 0,84; 0,97; 1,09; 1,25; 1,34; 1,40; 1,39; 1,43. \quad (3)$$

Искомые статистические зависимости запишем в виде суммы некоторой функциональной аналитической зависимости и случайной составляющей ε :

$$T(p) = tc(p) + \varepsilon, \quad (4); \quad V(p) = vc(p) + \varepsilon, \quad (5)$$

где $T(p)$ – статистическая зависимость времени действия ультразвука в зоне сварки от усилия; p – независимая непрерывная переменная – усилие, изменяющееся в том же диапазоне, что и переменная (1); $tc(p)$ – функциональная зависимость времени от усилия; $V(p)$ – статистическая зависимость скорости внедрения СИ от усилия; $vc(p)$ – функциональная зависимость скорости от усилия.

Аппроксимацию результатов эксперимента аналитическими зависимостями выполнили в математической среде MATHCAD. В результате получили:

$$tc(p) = 10,007 - 1,705 \cdot \ln(p - 7,569) \quad (6); \quad vc(p) = 0,736 \cdot \ln(p + 13,462) - 1,909 \quad (7)$$

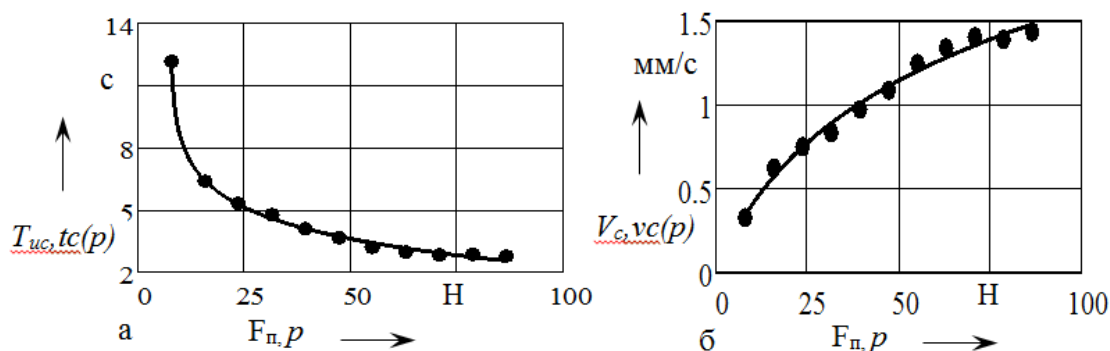


Рис. Диаграммы рассеивания и логарифмические регрессионные модели:
а – для зависимостей (2 и 6), б – для зависимостей (3 и 7)

Заключение

Определены адекватные регрессионные модели статистических зависимостей влияния статического усилия на время действия ультразвука в зоне сварки и на скорость внедрения рабочего торца СИ в полипропилен.

1. Мурашкин С.В., Селиванов А.С., Спиридонов Н.Г., Савина Е.Б. Статистические зависимости влияния времени воздействия ультразвука на прочность и другие параметры сварного соединения полипропилена//Frontier Materials & Technologies. № 1 – Тольятти: ТГУ, 2023.- С. 57–67.
2. Сварка полимерных материалов: Справочник / К.И. Зайцев, Л.Н. Мацюк, А.В. Богдасhevский и др.; Под общ. ред. К.И. Зайцева, Л.Н. Мацюк. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.: ил.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА14

Полуянов В.А., Мерсон Е.Д., Мягких П.Н., Мерсон Д.Л.

*Тольяттинский государственный университет, НИИ прогрессивных технологий,
Тольятти, Россия*

vitaliy.poluyanov@gmail.com

Магниевого сплавы обладают рядом таких уникальных свойств, как высокая удельная прочность, биосовместимость, способность к биорезорбции, что является весомым аргументом в пользу их применения в аэрокосмической и автомобильной отраслях промышленности, а также в медицине [1]. Однако, из-за низкой коррозионной стойкости их применение во многих случаях ограничено, в связи с чем повышение коррозионной стойкости магниевых сплавов, и изучение механизмов их коррозии являются весьма актуальными задачами. На данный момент известный набор методов, доступных для изучения коррозии магния и, в особенности, ее кинетики включает в себя: гравиметрический метод, традиционные электрохимические методы, мониторинг изменения уровня pH, а также метод измерения объема выделившегося водорода. Однако все эти методы, применяемые, в частности, для исследования кинетики коррозионных процессов в магнии и его сплавах имеют ряд недостатков, один из которых – недостаточная разрешающая способность для оценки малых изменений скорости коррозии на коротких отрезках времени. Из литературы известно, что для изучения коррозии магния и его сплавов в ряде исследований использовался метод акустической эмиссии (АЭ) [2-3], в частности, установлено, что АЭ обладает достаточной чувствительностью для определения зарождения и распространения питтинговой коррозии в чистом магнии. Утверждается, что одним из основных источников АЭ при коррозии являются пузыри водорода, выделяющегося в процессе коррозии. Несмотря на это, до настоящего момента не установлена прямая связь между параметрами АЭ и объемом водорода, выделяющегося в процессе коррозии магниевых сплавов, что позволило бы количественно измерять скорости коррозии по сигналам АЭ. Целью настоящей работы было установить связь между параметрами АЭ и объемом водорода, выделяющегося в процессе коррозии магниевого сплава МА14.

Для исследования был выбран промышленный сплав МА14 в виде экструдированного прутка диаметром 25 мм. Из указанного сплава при помощи токарной обработки были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 24 мм и толщиной 2 мм. Поверхность данных дисков была отшлифована наждачной бумагой до номера 2500. Коррозионные испытания длительностью 48 ч. проводили при комнатной температуре 24 ± 1 °C в водном растворе 0,9% NaCl. Испытания проводили при помощи установки и коррозионной ячейки, специально разработанных для данных экспериментов. В процессе испытания, с помощью мерной бюретки, установленной над образцом, производилась регистрация объема водорода, выделившегося из образца в процессе коррозии. Кроме того, с использованием усилителя Quantum X производилась запись потенциала разомкнутой цепи (ПРЦ) для всех образцов в течение всего эксперимента. Регистрация АЭ производилась пороговым методом при помощи АЭ-комплекса A-Line 32D (ООО «Интерюнис-ИТ», Россия) с частотой дискретизации платы АЦП 2 МГц, пьезоэлектрических широкополосных датчиков АЭ П111-(0,05-0,8) (Россия) с частотой пропускания 50-800 кГц и предусилителей ПАЭФ-014 (Россия) с коэффициентом усиления 26 дБ. В каждом эксперименте АЭ параллельно ре-

гистрировали двумя датчиками, один из которых был установлен на волноводе непосредственно под образцом, а второй – на волноводе, закрепленном на бюретке.

Разработанная для коррозионных испытаний установка позволяет: (1) определять среднюю скорость коррозии по потере массы образца и объему выделившегося водорода и (2) проводить исследования кинетики коррозионных процессов на поверхности металлов и сплавов, включая магниевые, тремя независимыми методами, основанными на регистрации: (i) изменения потенциала разомкнутой цепи, (ii) сигналов АЭ и (iii) объема выделившегося водорода.

Установка продемонстрировала возможность и высокую эффективность применения метода АЭ для исследования кинетики коррозионных процессов, протекающих на поверхности магниевых сплавов. В частности, установлено, что существует линейная связь между количеством сигналов АЭ и объемом выделяющегося водорода в процессе коррозии сплава МА14 в водном растворе 0,9% NaCl (рис. 1). Показано, что чувствительность метода АЭ к определению выделившегося водорода в процессе коррозии магния может на несколько порядков превышать чувствительность стандартного метода, основанного на определении объема водорода в бюретке. При этом датчик АЭ, установленный на образце, дает более объективную информацию (рис. 1а) по сравнению с датчиком, установленным на бюретке (рис. 1б).

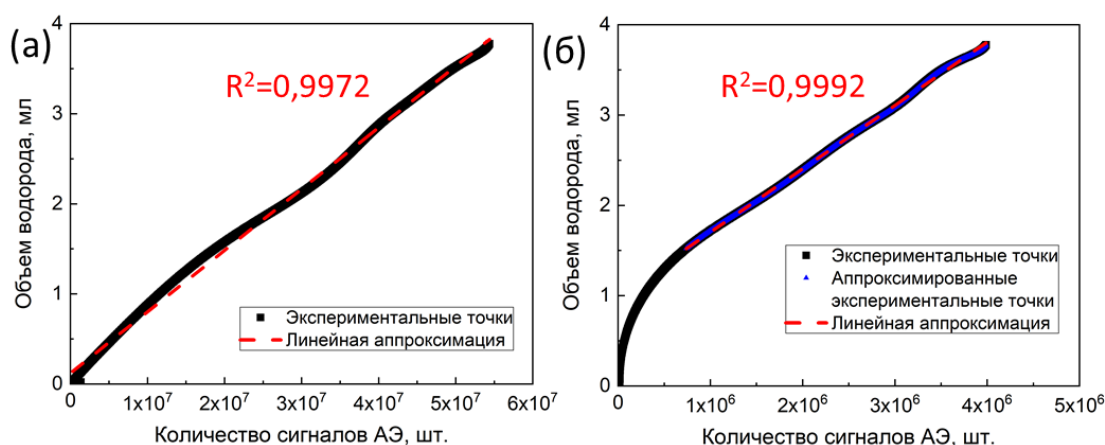


Рис. 1. Графики зависимости количества сигналов АЭ с датчиков на образце – (а) и на бюретке – (б) от объема выделившегося водорода в процессе коррозионного испытания и их линейные аппроксимации

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-19-00636.

1. M.R. Sabour, E. Taherkhani, A.R. Rezaei, M. Zohrevand, H. Safahi, G. Faraji, Solid-state recycling of magnesium and its alloys via plastic deformation: An overview of processing and properties, J. Mater. Res. Technol. 31 (2024) 3117–3148. doi:10.1016/j.jmrt.2024.07.032.
2. H.Y. Kim, J.Y. Kim, S.M. Lee, J.W. Byeon, Evaluation of pitting corrosion mechanism of AZ31 magnesium alloy by monitoring acoustic emission, Mater. Trans. 58 (2017) 123–126. doi:10.2320/matertrans.M2016302.
3. M. Knappek, P. Minárik, J. Čapek, R. Král, J. Kubásek, F. Chmelík, Corrosion of pure magnesium and a WE43 magnesium alloy studied by advanced acoustic emission analysis, Corros. Sci. 145 (2018) 10–15. doi:10.1016/j.corsci.2018.09.006.

КАВИТАЦИОННО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА АДДИТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сундуков С.К., Приходько В.М., Фатюхин Д.С., Нигметзянов Р.И.,
Кольдюшов В.К.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ), Москва, Россия*
sergey-lefmo@yandex.ru

Ультразвуковая жидкостная обработка является эффективным способом, позволяющим производить обработку сложнопрофильных поверхностей, полученных аддитивными технологиями, что обусловлено тем, что рабочими телами в данном случае являются кавитационные пузырьки, переносимые по обрабатываемой жидкости акустическими течениями различной масштабности [1-3]. Наибольший интерес с точки зрения машиностроения представляет обработка металлических изделий, полученных методом селективного лазерного плавления, с целью снижения шероховатости их поверхностей.

Основные исследования по данной тематике посвящены кавитационно-эрозионной (КЭО) и кавитационно-абразивной обработке (КАО) [например, 4-7]. В данных работах достигается снижение различных параметров шероховатости, но при этом аналогичные результаты получены при значительно отличающихся акустико-технологических параметрах обработки.

Поэтому требуется проведение дополнительных исследований по определению механизмов, обеспечивающих снижение шероховатости при КЭО и КАО. С этой целью в данной работе проведены феноменологические исследования процесса обработки поверхности с помощью высокоскоростной съёмки и её последующей обработки.

Анализ фрагментов высокоскоростной съёмки КЭО позволил установить закономерности формирования и распределения кавитационных образований по обрабатываемой поверхности. Основным механизмом распределения кавитационных пузырьков по поверхности является притяжение маленького пузырькового образования, движущегося в потоке, большими кластерами, действующими в местах наибольших неоднородностей поверхности, что согласуется с традиционными представлениями об ультразвуковой жидкостной обработке. В результате такая обработка может применяться для удаления с поверхности неровностей, имеющих слабую адгезию (брызги металла, частично расплавленный порошок), а при значительном времени воздействия может наоборот, приводить к повышению шероховатости.

При КАО воздействие производится по всей обрабатываемой поверхности вследствие перемещений абразивных частиц, обусловленных влиянием кавитационных кластеров. В зависимости от характера движения частиц пять основных механизмов воздействия абразивных частиц на поверхность: удар абразивной частицы, движущейся в акустическом потоке; движение частицы вдоль поверхности; удар частицы о поверхность при схлопывании кавитационной области; колебания частицы в пульсирующей кавитационной области; вращение абразивной частицы. При обработке абразивные частицы реализуют разные механизмы одновременно или последовательно, далее после отработки по поверхности акустический поток возвращает их обратно к поверхности и обработка начинается заново. Этот процесс повторяется в течение всего времени проведения КАО. Произведены расчёты, позволяющие сравнить эффективность воздействия каждого механизма в отдельности. Общий эффект при обработке поверхности будет являться накопительным и представлять собой суммарное воздействие различных частиц реализующих рассмотренные механизмы.

Проведены сравнительные экспериментальные исследования по влиянию КАО на наиболее распространённые материалы, применяющиеся аддитивном производстве: стали РН-1, 316L и титановый сплав Ti6Al4V. В процессе обработки амплитуда колебаний составляла 20 мкм, расстояние от торца излучателя колебательной системы до обрабатываемой поверхности 20 мм. В качестве абразива использовался карбид бора. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры шероховатости после КАО для различных материалов

Материал	Ra , мкм до обработки	Технологическая жидкость	Время обра- ботки, мин	Ra , мкм после обработки
РН-1	17,9	H ₂ O	2 мин	7,51
316L	17	H ₂ O	20 мин	8,93
Ti6Al4V	28,6	3%HF + 5%HNO ₃ + H ₂ O	10 мин	16,2

Таким образом, изменение шероховатости зависит от многих факторов, основными из которых являются физико-механические свойства обрабатываемого материала, начальная шероховатость поверхности и параметры ультразвуковой обработки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00463, <https://rscf.ru/project/24-19-00463/>

1. Сундуков, С.К. Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъёмных соединений / С.К. Сундуков. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр", 2023. – 269 с. – ISBN 978-5-94385-209-1
2. Improvement in Ultrasound Liquid Machining by Activating Cavitation Clusters / R. I. Nigmatzyanov, V. F. Kazantsev, V. M. Prihod'ko [et al.] // Russian Engineering Research. – 2019. – V. 39, No. 8. – P. 699-702.
3. Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles—an overview // Ultrasonics sonochemistry. – 2011. – V. 18. – Iss. 4. – P. 864-872.
4. K.L. Tan, S.H. Yeo, Surface finishing on IN625 additively manufactured surfaces by combined ultrasonic cavitation and abrasion, Additive Manufacturing, Volume 31, 2020, 100938
5. Wang J., Zhu J., Liew P. J. Material removal in ultrasonic abrasive polishing of additive manufactured components // Applied Sciences. – 2019. – V. 9. – №. 24. – P. 5359.
6. Sun M., Toyserkani E. A Novel Hybrid Ultrasound Abrasive-Driven Electrochemical Surface Finishing Technique for Additively Manufactured Ti6Al4V Parts // Inventions. – 2024. – V. 9. – №. 2. – P. 45.
7. Grigoriev S. N. et al. Effect of cavitation erosion wear, vibration tumbling, and heat treatment on additively manufactured surface quality and properties // Metals. – 2020. – V. 10. – №. 11. – P. 1540.

ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сундуков С.К., Нечай А.А., Рахматулаев А.А.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ), Москва, Россия
sergey-lefmo@yandex.ru*

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) – важная и актуальная тема современного машиностроения. Сочетание различных типов связую-

щих и наполнителей позволяет добиться свойств сопоставимых с металлическими материалами или даже превышать их. Преимуществами таких материалов являются снижение металлоёмкости производства, снижение массы конечного изделия, уменьшения себестоимости производства. Области применения ПКМ это изготовление деталей на замену металлическим, нанесение покрытий различного функционального назначения и использование в качестве соединительного материала при получении клеевых соединений. В настоящее время для расширения возможностей применения ПКМ требуется проведение широкого спектра исследований по вопросам механических и эксплуатационных свойств, а также разработка технологий по совершенствованию процесса их получения и повышения свойств [1].

В данной работе для этой предлагается использование ультразвуковых технологий в процессе получения ПКМ, который заключается в смешивании и распределении наполнителя в связующем. Введение ультразвуковых колебаний в жидкую дисперсную систему будет оказывать влияние и на жидкое связующее и наполнитель.

Обработка вязкого полимера позволяет повысить его свойства. Так, проведены исследования по ультразвуковой обработке двухкомпонентного эпоксидного клея ЭДП [2, 3]. Ультразвуковая обработка на любой амплитуде приводит к изменению вязкости эпоксидного клея. При этом для каждого из рассмотренных режимов изменение происходит в три этапа: первый – резкое снижение вязкости на 50-80%; второй – период обработки без существенных изменений; третий – резкое возрастание вязкости, вплоть до значений выше начального. Такие изменения связаны с эффектами, возникающими в жидкой среде, при введении в неё колебаний ультразвуковой частоты – кавитации, приводящей к дефрагментации макромолекул и полимерных цепочек, и акустических потоков, которые вызывают сдвиговые деформации, снижающие сопротивление между слоями обрабатываемого вещества. Из вторичных эффектов наибольшее влияние на изменение вязкости играет нагрев, который возникает при поглощении жидкой средой акустической энергии.

Снижение вязкости повышает заполняющую способность при нанесении ПКМ на поверхность, а также облегчает распределение наполнителя по связующему. В качестве оптимальных режимов выбраны те, при которых осуществляется наибольшее снижение вязкости при наименьшем нагреве, что соответствует точкам окончания первого этапа.

Эффективность воздействия ультразвуковых эффектов на частицы дисперсной фазы обусловлена возможностью диспергирования слипшихся частиц наполнителя под действием кавитации, и повышения смачивания частиц наполнителя связующим.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00463, <https://rscf.ru/project/25-29-00013/>

1. Shang X. et al. Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends //Composites Part B: Engineering. – 2019. – V. 177. – P. 107363.
2. Сундуков, С. К. Подготовка эпоксидного клея методом ультразвуковой обработки / С. К. Сундуков // Клеи. Герметики. Технологии. – 2023. – № 9. – С. 32-40.
3. Сундуков, С. К. Взаимодействие клея и подложки в условиях ультразвуковых колебаний / С. К. Сундуков // Клеи. Герметики. Технологии. – 2023. – № 8. – С. 12-19.

МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИСТРАЦИИ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЛОЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОЕДИНЯЕМЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ

Маняхин И.А., Голых Р.Н., Барсуков Р.В.

*Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский
государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, Россия
manyaxin.ivan@bk.ru*

Увеличение прочностных характеристик сварных швов на сегодняшний день является важной задачей для разных отраслей промышленности [1]. Так для производства гемоконтейнеров, требуется соединять полимерные плёнки, конечный продукт должен обладать герметичностью и адгезионной прочностью. Наиболее предпочтительным способом для создания соединений между плёнками является ультразвуковая сварка, так как нагрев в месте сварки незначителен, что сводит к минимальному выделению токсичных веществ внутри гемоконтейнера и их дальнейшего попадания в кровь [2].

Ультразвуковая сварка полимеров является сложным технологическим процессом, состоящим из нескольких стадий. На первом этапе происходит межфазное трение, что приводит к локальному разогреву поверхности в месте контакта между ультразвуковым излучателем и полимером. Затем при достижении температуры размягчения полимера происходит проникновение ультразвукового инструмента вглубь озвучиваемого материала. На втором этапе возникает межмолекулярное трение внутри полимера и образуется область введения ультразвуковых колебаний в полимер [3], состоящая из четырёх секторов. В первом секторе находится расплавленный полимер, в котором может возникать кавитация. Во втором секторе полимер в вязкотекучем состоянии, а в третьем в вязкопластичном. В четвёртом секторе находится твёрдый полимер [4].

Для исследования кавитационных процессов в сварных швах был разработан лабораторный стенд, который позволит обнаружить ультразвуковую кавитацию в расплавах полимеров, имеющих низкую оптическую плотность. Этиленвинилацетат (ЕВА) был выбран в качестве тестового образца, температура плавления которого составляет 120°C. ЕВА широко используется как расходный материал для стержневых клеевых пистолетов, а также для изготовления шлангов, и обуви, так как считается экологичным материалом [5]. На рисунках 1а и 1б представлена лабораторная установка для регистрации кавитации в расплавленных полимерах при ультразвуковом воздействии. Основными компонентами установки являются ультразвуковая колебательная система (УЗКС) (1), пробирка (2), электрическая плата с оптическим датчиком TCST1103 (3), нагревательный элемент (4), штатив (5), зажимы для пробирки (6). На начальном этапе производится нагрев исходного полимера до состояния расплава, без кипения, при помощи нагревательного элемента. В расплавленный полимер погружается УЗКС, строго по центру пробирки, кончик излучателя размещается между фотоприемником (7) и светодиодом (8) оптического датчика. Затем область съёмки закрывается экраном, который заземлён и соединён с УЗКС, для защиты от электромагнитных наводок на электронную схему.

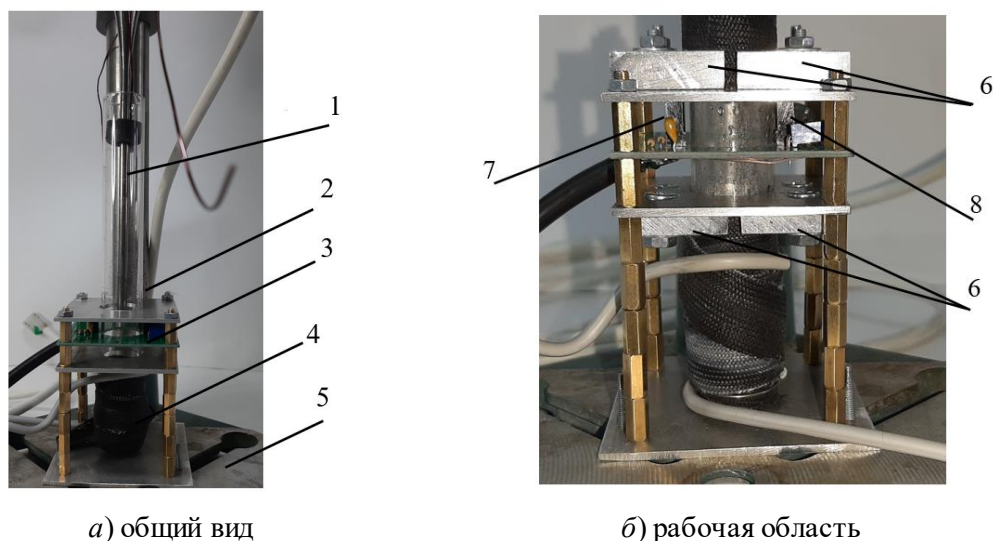


Рис. 1. Ультразвуковой лабораторный стенд для исследования кавитационных явлений в расплавах полимеров

На следующем этапе происходит подача ультразвуковых колебаний на излучатель. Под действием ультразвуковых колебаний в расплаве возникает кавитация, которая улавливается фотоприёмником, сигнал с которого попадает на широкополосный анализатор спектра электрических сигналов. Интенсивность кавитации определяется как изменение электрического напряжения на выходе фотодиода оптического датчика за время Δt .

Выводы

Была разработана экспериментальная установка, которая позволит исследовать быстротекущие кавитационные процессы в ходе ультразвуковой сварки полимеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00314, <https://rscf.ru/project/24-22-00314/>.

1. Samuel T. A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties // International Conference on Recent Developments in Material Science and Applications (ICRDMSA 2020). – Chennai. – 2020. – Volume 988. – 012113.
2. Григорьев Л. В., Цхе А. В., Барсуков Р. В., Хмелёв В. Н. Способ изготовления гемокоптейнера для лиофилизирования, хранения и регидратирования гемокомпонента // Патент России № 2822960. 2024. Бюл. № 20.
3. Yaqiong W. Ultrasonic welding of fiber reinforced thermoplastic composites: Current understanding and challenges // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2021. – Volume 149. – 106578.
4. Барсуков Р. В. Стенд для исследования кавитационных явлений в полимерах и их расплавах при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности // Ползуновский вестник. – 2024. – №4. – С. 161-166.
5. Верижников, Е. Ю. Прочность материалов используемых в производстве спортивной обуви / Е. Ю. Верижников, И. Л. Волкова // Физика и современные технологии в АПК : материалы XI Всероссийской молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников с международным участием, Орёл, 19 февраля 2020 года / Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина. Том Часть 2. – Орёл: ООО Полиграфическая фирма «Каргуш», 2020. – С. 88-91.

ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В РЕЖИМАХ РАЗВИТОЙ И ВЫРОЖДЕННОЙ КАВИТАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ»

Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Маняхин И.А., Хмелёв В.Н.

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

Бийск, Россия

romangl90@gmail.com

Трёхмерная численная модель влияния ультразвукового воздействия на межфазную поверхность «газ-жидкость» разработана для следующей постановки задачи. В жидкости присутствуют барботажные пузырьки стабильных размеров в ходе реализации процессов газации или дегазации жидкости, а также химических реакций газа с жидкостью. Эффективность таких процессов, несомненно, определяется площадью границы раздела. В окружающей барботажный пузырёк (размером более 1 мм) жидкости формируются кавитационные пузырьки малых размеров (не более 200 мкм). Ударные волны, формируемые при схлопывании кавитационных пузырьков, позволяют увеличить межфазную поверхность и, следовательно, повысить эффективность массообменных процессов.

Схематичное изображение увеличения межфазной поверхности под действием кавитации представлено на рисунке 1.

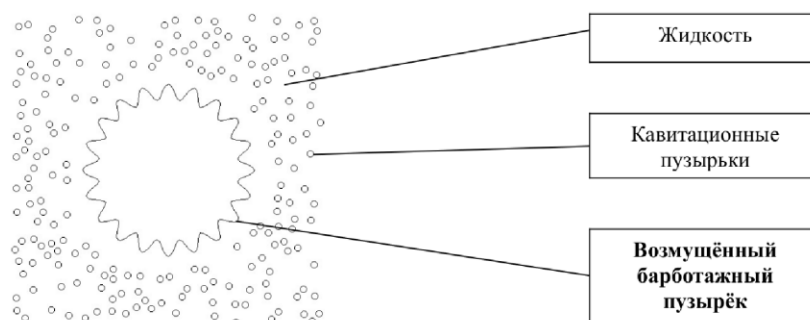


Рис. 1. Схематичное изображение формирования межфазной поверхности под действием кавитации

Модель состоит из 2-х частей.

1. Формирование кавитационных пузырьков в области, окружающей барботажный пузырёк. Система уравнений формирования кавитационных пузырьков получена с использованием дивергентной формы относительно 2-х величин – колебательные составляющие вектора «плотность-удельный импульс» и мгновенного значения давления в жидкости.

В отличие от ранее известных моделей формирования и распространения кавитационной области [1–3], построенное уравнение одновременно учитывает совокупность факторов:

- 1) нелинейное изменение индекса кавитации и его влияние на акустические свойства среды;
- 2) наличие стационарного течения, связанного с поглощением колебаний в зоне кавитации;
- 3) динамические граничные условия на поверхности аэрационного канала и барботажных пузырьков размером не менее 1 мм (колебательная составляющая = 0).

В то время как в ранее предложенных моделях перечисленные либо учитывалась часть из перечисленных факторов, либо факторы рассматривались для одиночного кавитационного пузырька, который получить невозможно.

С предложенным динамическим граничным условием модель позволяет исследовать распространение кавитационной области в объёме, ограниченном не только твёрдыми стенками, но и содержащем газы и включения. Такая модель позволяет при решении впервые учесть не только влияние ультразвукового кавитационного возмущения барботажных пузырьков, но и обратное их влияние на кавитационно-акустическое поле («система с обратной связью»).

2. Формирование поверхностных волн на границе барботажных пузырьков.

При построении системы уравнений образования поверхностных волн на границе барботажных пузырьков приняты во внимание следующие особенности формирования межфазной поверхности:

1) Уже сформированные барботажные пузырьки в жидкости не дробятся, а максимум, что с их поверхностью происходит, формируются капиллярные волны с длиной значительно меньшей, чем размер пузырька.

2) Согласно численному моделированию акустического поля установлено:

– вблизи барботажного пузырька имеется пристеночный слой, толщиной, не превышающей $0,1...0,3$ от радиуса пузырька, в котором имеется градиент амплитуды акустического давления;

– в пристеночном слое возможно наличие развитой кавитации, даже если в окружающей жидкости имеется вырожденная кавитация;

– расстояние от ближайшего схлопывающегося кавитационного пузырька от стенки барботажного ограничено минимальным значением;

– капиллярные волны на поверхности аэрационного пузырька (размером $1...3$ мм) с амплитудой до $0,8$ (порядка 120 мкм) от длины волны (порядка 150 мкм) не влияют на макроскопические параметры кавитации в окружающей жидкости.

Математическая постановка задачи формирования волн на поверхности барботажных пузырьков сформулирована в обобщённых функциях медленного роста. С учётом указанных особенностей для расчёта волн на поверхности барботажных пузырьков строго доказана теорема о регулярности профиля волн (обобщённая функция медленного роста) при наличии схлопывающихся пузырьков, описываемых суммой дельта функций. Разработана программа для расчёта увеличения удельной межфазной поверхности при заданных параметрах кавитации в пристеночном слое.

На основании анализа численной модели установлено, что максимальная площадь межфазной поверхности достигается вблизи зоны вырожденной кавитации (увеличение — до $1,7$ раз). Указанное увеличение межфазной поверхности достигается при средней интенсивности воздействия (около 3 Вт/см² (амплитуда звукового давления около 4 атм) на частоте 22 кГц; $6..10$ Вт/см² на частоте 44 кГц; $20...30$ Вт/см² на частоте 66 кГц).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>

1. Bretz, N. Numerical simulation of ultrasonic waves in cavitating fluids with special consideration of ultrasonic cleaning / N. Bretz, J. Strobel, M. Kaltenbacher, R. Lerch // IEEE Ultrasonics Symposium. – 2005. – P. 703–706.
2. Розенберг, Л.Д. Мощные ультразвуковые поля / Л.Д. Розенберг. – М.: Наука, 1968.
3. Golykh, R. Evaluation of Optimum Model and Conditions Providing Increasing Ultrasonic Cavitation Area in High-Viscous and Non-Newtonian Fluids / R. Golykh, A. Shalunov, V. Khmelev, R. Lopatin, V. Minakov, V. Shakura // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. – 2020. – No. 2. – P. 101–108.

РЕЖИМЫ И УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕНА ГАЗА В ЖИДКОСТЯХ КОНЕЧНОЙ ВЯЗКОСТИ

Барсуков А.Р., Голых Р.Н., Карра Ж.-Б., Маняхин И.А., Хмелёв В.Н.

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

Бийск, Россия

barsukov.ar@bti.secna.ru

Массообменным процессам в системах «газ-жидкость» свойственен низкий коэффициент диффузии [1] (коэффициент диффузии газа в жидкости до 10 000 раз меньше, чем коэффициент диффузии газа в газе), который является одним из основных факторов, ограничивающих их эффективность. В настоящее время одним из перспективных способов повышения эффективности протекания массообменных процессов в жидких и жидкодисперсных средах является увеличение межфазной поверхности, достигаемое при возбуждении капиллярных волн на границе раздела «газ-жидкость» (например, на поверхности барботажного пузырька) за счёт кавитационных явлений при воздействии ультразвуковыми колебаниями [2–3].

Для выявления оптимального режима кавитационного воздействия были проведены экспериментальные исследования с применением высокоскоростной камеры (210 000 кадров/с), фиксирующей результат воздействия ультразвука на поверхность пузырьков газа в жидкости (рисунок 1). На основе анализа внешнего контура проекции пузырьков на плоскость изображения в сочетании с Фурье-анализом градиентов яркости изображения было установлено, что сформированные устойчивые капиллярные волны на поверхности обеспечивают её увеличение до 1,5 раз и более.

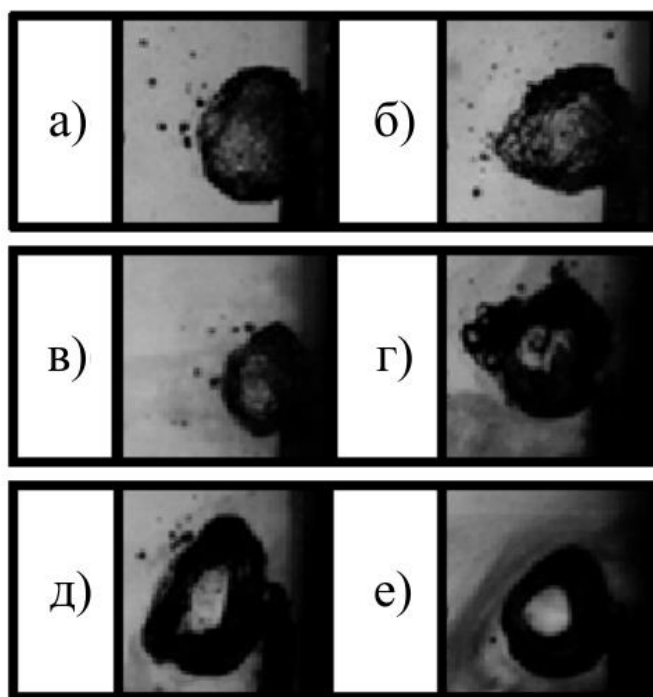


Рис. 1. Изображения 2D-проекции поверхности аэрационных пузырьков для различных вязкостей среды (*а* – 1 мПа·с; *б* – 1,5 мПа·с; *в* – 3,7 мПа·с; *г* – 6,5 мПа·с; *д* – 11,6 мПа·с; *е* – 41,2 мПа·с)

Ввиду значительного влияния вязкости озвучиваемой среды на затухание капиллярных волн, авторами была выявлена предельная динамическая вязкость жидкости, при которой наблюдается эффект увеличения межфазной поверхности: ~6 мПа·с при температуре 20 °С. Также проведённые эксперименты показали, что при нагреве жидкости до 60 °С предельная вязкость, при которой сохраняется эффект увеличения межфазной поверхности, возрастает до 40 мПа·с и более. Повышение температуры озвучиваемой среды в данном случае влияет на два взаимоисключающих фактора в попытках получить высокую эффективность ультразвуковой интенсификации – с одной стороны, снижение вязкости при более высоких температурах способствует уменьшению затухания волновых процессов, с другой стороны, при температуре 50 °С и выше наблюдается ослабление кавитационных эффектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

1. Новоселов А.Г., Селиверстова Е.Г., Сорокин С.А., Дужий А.Б. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии кислорода в воде. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2020. № 3. С. 21–26.
2. Сидельников И.И., Пирогова О.В., Зарипова А.М. Повышения эффективности контактных устройств массообменных колонных аппаратов путем наложения ультразвуковых колебаний: Материалы XIII Международной научно-практической конференции. 2021. С. 24–28.
3. Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Карра Ж.-Б., Маняхин И.А., Минаков В.Д., Барсуков А.Р. Физика ультразвуковой интенсификации массообмена «газ-жидкость» для решения экологических проблем и получения новых материалов: теория, эксперимент, приложения. Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата: Материалы III Всероссийской конференции, посвященной 25-летию Института проблем нефти и газа СО РАН., Якутск, 10–13 сентября 2024 года. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании. 2024. С. 175–179.

МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ РЕГИСТРАЦИИ УВЕЛИЧЕНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ

Маняхин И.А., Голых Р.Н., Карра Ж.-Б., Барсуков А.Р., Хмелёв В.Н.

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия
manyaxin.ivan@bk.ru

Массообменные процессы в системах «газ-жидкость» являются энергозатратными процессами, который важен при производстве и транспортировке топлива на основе нефти для увеличения пожарной и взрывной безопасности. В нефтяных системах данная операция применяется для удаления попутных нефтяных газов, низкомолекулярных углеводородов - метана, этана, а также сероводорода, азота и углекислого газа. При температуре свыше 350° происходит отделение легких (газовых, бензиновых) фракций нефти, что может приводить излишней загазованности и увеличению риска самовоспламенения нефти или её паров [1]. Также важна безопасная очистка нефтяных резервуаров после проведения

технологических операций с нефтепродуктами [2]. При производстве стали также выполняется дегазация, данный процесс производится, когда материал находится в расплавленном состоянии, и содержит смесь, газов, соединений серы и других нежелательных включений, влияющих на качество готовой продукции [3].

Ультразвуковая интенсификация массообмена в системах «газ-жидкость» позволяет увеличить межфазную поверхность и повысить эффективность данных процессов [4].

Для определения режимов ультразвуковой интенсификации массообмена была разработана экспериментальная установка. В состав экспериментальной установки ультразвуковой аппарат мощностью до 1000 ВА с технологическим объёмом, содержащим инжекционный канал для подачи воздуха; камера скоростной киносъёмки Photron FASTCAM SA-Z с системой дополнительного освещения. Камера регистрирует кадры со скоростью до 210000 кадров в секунду при разрешении 380x160 пикселей. Температура гетерогенной системы со сплошной жидкой фазой определяется при помощи 4 термопар, которые могут быть размещены независимо относительно друг друга в объёме для ультразвуковой обработки. Температурные данные записываются в файл на ПК в течение всего времени акустического воздействия на озвучиваемую среду. Установка обеспечивает поддержание стабильной температуры в диапазоне 30 до 80 °C с помощью нагревателя ТЭП-5000K1 и температурного ПИД-регулятора TRM-10. Установка способна работать в непрерывном и импульсном режимах ультразвукового воздействия.

Результаты съёмки с помощью высокоскоростной камеры были обработаны при помощи программы, которая анализирует контур парогазовых барботажных пузырьков на изображении. На основании данных о контуре вычисляется площадь межфазной поверхности в системе «жидкость-газ». Было выявлено, что непрерывное ультразвуковое воздействия позволяет увеличить площадь межфазной поверхности барботажных пузырьков до 1,5 раз и более.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>.

1. Tannous J. H. Impact of co-feeding cracked light products on visbreaking of vacuum residue deasphalted oil / J. H. Tannous, Y. Yan, A. D. Klerk // Fuel. – 2022. – Volume 310, Part B. – 122182.
2. Назаров В. П. Методы и способы снижения пожаровзрывоопасности процессов дегазации нефтяных резервуаров / В. П. Назаров // Пожары и ЧС. – 2019. – №1. – С. 19-24.
3. Мурашов В. А. Дегазация стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия // Известия ТПУ. – 2024. – №1. – С. 140-147.
4. Голых, Р.Н. Влияние ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность «газ-жидкость» при принудительной аэрации / Р.Н. Голых, Ж.-Б. Карра, В.Н. Хмелёв, И.А. Маняхин, В.Д. Минаков, Д.В. Генне, А.Р. Барсуков // Прикладная механика и техническая физика. – 2024. – Т. 65, № 6. – С. 83-98. 10.15372/PMTF202315435

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕЗКИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН И УГЛЕПЛАСТИКА В ИННОВАЦИЯХ И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ

Вьюгинова А.А.¹, Новик А.А.², Вьюгинов С.Н.², Новик А.А.²,
Лбов А.А.², Новик А.А.²

¹ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

aavyuginova@etu.ru

² ООО «ИНЛАБ – Ультразвук», Санкт-Петербург, Россия

inlab@utinlab.ru

Одной из востребованных ультразвуковых технологий является технология ультразвуковой резки. Ее главная особенность и преимущество заключается в том, что осуществление реза под воздействием ультразвука происходит при околонулевом трении, на практике это позволяет осуществлять рез без образования замятий, разрушения или деформирования, получать рез высокого качества с высокой скоростью [1]. Для резки ряда пищевых и непищевых продуктов получили широкое распространение ультразвуковые ножи из титановых сплавов [2], при этом существуют специальные технологии, в условиях осуществления которых предъявляются повышенные требования к износостойкости режущей части ножей. К таким технологиям, в частности, относятся технологии резки углеродных волокон и углепластика (карбона), стекловолокна и стеклоткани и др. Для решения этой задачи используются ультразвуковые ножи с твердосплавными вставками из карбида вольфрама, которые до недавнего времени не производились в России. В результате проведенных нашим коллективом работ, было осуществлено проектирование и разработана технология производства ультразвуковых ножей с твердосплавными вставками – на рис. 1 приведена партия ножей с прямоугольным лезвием.

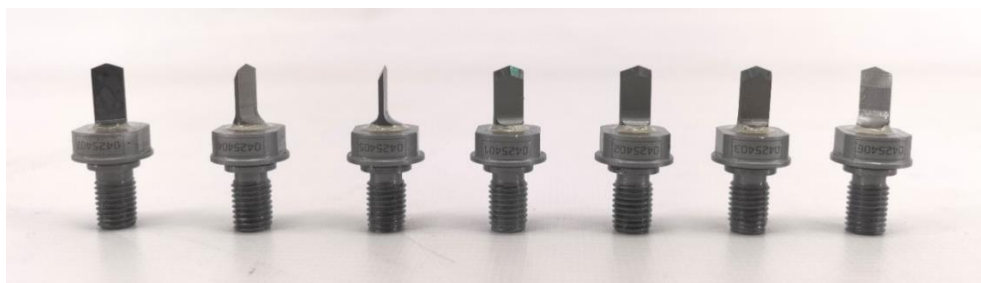


Рис. 1. Ультразвуковые ножи с твёрдосплавным лезвием прямоугольной формы

В зависимости от особенностей технологии резки (в авиационной, космической, автомобильной отраслях, судостроении и др.), режима работы ультразвукового оборудования – ручного, полуавтоматического, автоматического, в том числе, с использованием роботизированных манипуляторов, предъявляются требования к форме режущей части – на рис. 2 вариант с треугольным лезвием.



Рис. 2. Ультразвуковые ножи с твёрдосплавным лезвием треугольной формы

Составными частями системы ультразвуковой резки помимо непосредственно ножей являются ультразвуковой генератор и ультразвуковой преобразователь – нашим коллективом осуществляется разработка и производство комплектных систем ультразвуковой резки, оснащенных всем необходимым в соответствии с требованиями конкретной технологии. Примеры вариантов выпускаемых генераторов и преобразователей приведены на рис. 3.

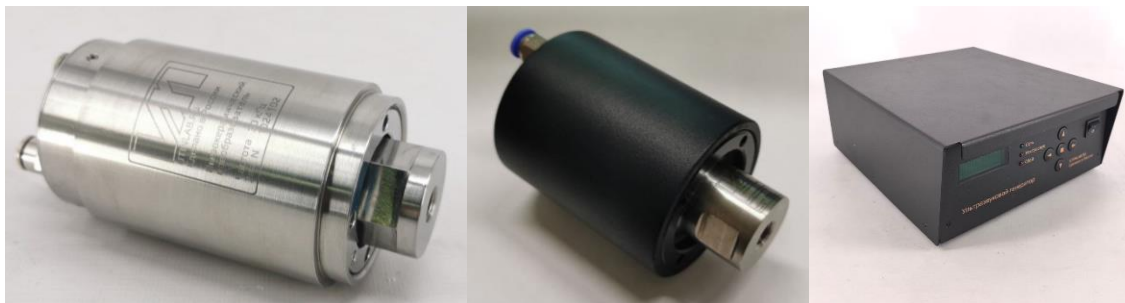


Рис. 3. Варианты исполнения преобразователей и генератора ООО «ИНЛАБ – Ультразвук»

На рис. 4 приведен пример реализации ультразвуковой резки с использованием ножа с вставкой из карбида вольфрама.



Рис. 4. Ультразвуковая резка с использованием оборудования ООО «ИНЛАБ – Ультразвук»

Кроме систем ультразвуковой резки производится и другое разнообразное ультразвуковое технологическое оборудование, обеспечивающее возможности импортозамещения и позволяющее разрабатывать, внедрять и реализовывать инновационные подходы в производственных процессах и технологиях [3-4].

Ультразвуковое технологическое оборудование нашего производства ни в чем не уступает современным мировым образцам, постоянно совершенствуется и оперативно подстраивается под требования и развитие промышленных технологий, при этом заказчикам обеспечивается полная поддержка и постпродажное обслуживание.

1. Ультразвуковое технологическое оборудование [Электронный ресурс] // URL: <https://utinlab.ru> (Дата обращения: 07.04.2025)
2. Вьюгинова А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А.А. Моделирование ультразвуковых инструментов для раскроя сотовых панелей из алюминия и арамида (кевлара) // Акустический журнал, 2024, 70, с. 120-125
3. Вьюгинова А.А., Новик А.А., Новик А.А. Импортозамещающие разработки в области ультразвукового технологического оборудования // «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы»: материалы международной научной конференции, Витебск, 29–31 марта 2023 г.
4. Ультразвуковое оборудование: импортозамещение [Электронный ресурс] // URL: <https://ультразвуковое-оборудование.рф> (Дата обращения: 07.04.2025)

ВЕРИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИМИТАЦИИ ВНЕШНИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Чеботарева Е.А., Лобанов Д.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Пермь, Россия

cem.chebotareva@mail.ru

Композиционные материалы на основе стеклопластиковых волокон широко используются в различных отраслях, включая энергетику, авиацию, транспорт. Они обладают высоким соотношением прочности к весу, долговечностью и устойчивостью к коррозии, что делает их эффективной альтернативой традиционным металлам. Однако при производстве и эксплуатации возможны повреждения материала, которые в дальнейшем могут быть причиной разрушения конструкций [1-3]. Современные методы экспериментальной механики позволяют оценить влияние эксплуатационных и наружных повреждений на механические характеристики материала. Среди перспективных методов можно отметить метод акустической эмиссии, который основан на регистрации упругих волн в материале при деформации [4-5].

Были проведены экспериментальные исследования влияния эксплуатационных дефектов, таких как, поверхностные царапины и вмятины на изменение остаточных механических свойств полимерного слоистого стеклопластика. Были разработаны и успешно применены методики нанесения поверхностных повреждений при контролируемых параметрах нагружения (сила, перемещение). Суть методики нанесения дефекта «вмятина» заключалась в приложении нагрузки, при помощи испытательной системы Instron 5982 (100кН), к образцу стеклопластика в поперечном направлении через стальной вал с полусферическим наконечником диаметром 10мм (рис. 1).

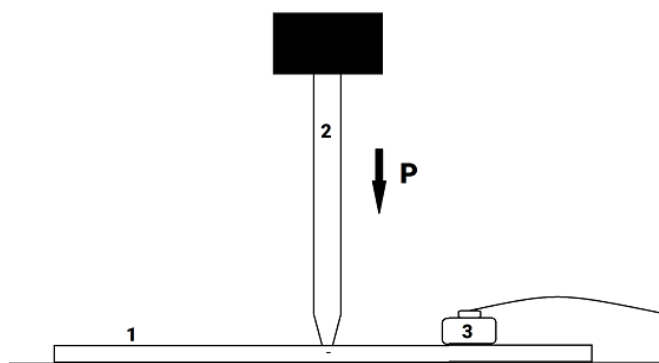


Рис. 1. Схема нанесения дефектов, 1 – образец, 2 – нагружающий стержень, 3 – датчик регистрации сигналов акустической эмиссии

В ходе предварительных испытаний по нанесению имитационных дефектов поверхности были установлены диапазоны значений нагрузки вдавливания стального вала с полусферическим наконечником, которые либо совсем не приводили к повреждениям образца, либо полученные повреждения не оказывали влияния на несущую способность стеклопластика. Также были установлены диапазоны значений нагрузок, которые в процессе вдавливания приводили к появлению видимых макродефектов (сквозные трещины, разрыв поверхностных слоев и т.д.).

Методика нанесения дефекта царапина реализована аналогичным способом, только вместо стального вала со сферическим наконечником повреждение образцов стеклопластика наносилось стальным лезвием шириной 10 мм до нагрузки 1 кН и перемещения захвата машины на 1 мм.

Испытания по нанесению повреждений проводились совместно с системой регистрации сигналов акустической эмиссии для анализа поврежденности образцов с помощью системы AMSY-6. Был использован широкополосный пьезоэлектрический датчик AE144A и предусилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Частота дискретизации данных составляла 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ – 40 дБ. Датчик был закреплен в 20 мм от места наносимого дефекта с использованием силиконовой смазки для лучшего контакта с поверхностью образца.

По полученным данным был проведен параметрический анализ сигналов акустической эмиссии, включающий в себя следующие параметры: кумулятивная энергия, количество сигналов, пиковые амплитуды, пиковые и медианные частоты и время нарастания сигналов. Также были построены распределения отношения времени нарастания к пиковой амплитуде и медианных частот для испытаний с различной степенью нанесения дефектов: от 10 кН до 22 кН для вмятин и для 10 кН для царапин. Были отмечены закономерности распределения сигналов в зависимости от степени повреждения стеклопластиковых образцов.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете с использованием уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» <http://ckp-rf.ru/usu/501309/>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00188, <https://rscf.ru/project/25-29-00188/>

1. Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С., Чеботарева Е.А. Экспериментальное изучение предельных деформаций и разрушение стеклопластиков с концентраторами напряжений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2024. - №4. - С. 98-112. doi:10.15593/perm.mech/2024.4.09;
2. Strungar E.; Lobanov D.; Mugatarov A.; Chebotareva E., Deformation processes of polymer composites with stress concentrators under different reinforcement schemes // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2024. Vol. 43 DOI:10.1177/07316844241281780
3. Slovikov, S., Lobanov, D. S., Chebotareva, E., Melnikova, V. (2024). The influence of technological defects on the mechanical behavior of CFRP during buckling under compression based on DIC data and acoustic emission. Frattura Ed Integrità Strutturale, 18(69), 60–70. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.69.05>;
4. Lobanov, D.; Yankin, A.; Mullahmetov, M.; Chebotareva, E.; Melnikova, V. The Analysis of Stress Raisers Affecting the GFRP Strength at Quasi-Static and Cyclic Loads by the Theory of Critical Distances, Digital Image Correlation, and Acoustic Emission. Polymers 2023, 15, 2087. <https://doi.org/10.3390/polym15092087>;
5. V. Wildemann, E. Strungar, D. Lobanov, A. Mugatarov, E. Chebotareva / Experimental Study of Postcritical Deformation Stage Realization in Layered Composites during Tension using Digital Image Correlation and Acoustic Emission // Acta Mechanica Sinica, 2024, ISSN 0567-7718. <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23468-x>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Чеботарева Е.А., Староверов О.А., Струнгарь Е.М.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*
cem.chebotareva@mail.ru

Полимерные композиты (ПКМ) заменяют металлы в авиации, транспорте и строительстве благодаря малому весу при высоких механических характеристиках. Однако их слоистая структура уязвима к поперечным нагрузкам, что ограничивает применение. Для повышения надёжности необходимо изучение влияния ударных воздействий на остаточную прочность [1-3]. Для выявления визуально неопределимых повреждений используются методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковой контроль и метод корреляции цифровых изображений (DIC). Также используется метод акустической эмиссии для анализа механизмов разрушения в материале [4-5]. Данная работа исследует влияние низкоскоростных ударов на усталостную долговечность тканых композитов при сжатии, используя современные методы диагностики.

В работе проведены экспериментальные исследования по изучению остаточной прочности и долговечности образцов из тканного стеклопластика после предварительных ударных воздействий. Испытания на сжатие проводились при квазистатических и циклических нагружениях. В процессе испытания были использованы видеосистема для регистрации перемещений и деформаций на поверхности образца и метод акустической эмиссии.

Исследование влияния локальных поперечных ударов на остаточную прочность и усталостную долговечность стеклопластиков выявило пороговые значения ударной чувствительности. Испытания на сжатие показали, что диаграммы нагружения неповреждённых образцов имели билинейный характер, тогда как после ударного воздействия форма кривых изменялась. Установлено, что даже незначительные ударные повреждения, не вызывающие видимого расслоения, могут существенно снижать долговечность из-за концентрации напряжений. При этом малые расслоения практически не влияли на остаточную прочность, но с ростом энергии удара наблюдалась чёткая корреляция между уменьшением прочности и увеличением площади повреждённой зоны. По полученным данным можно отметить, что в зоне удара формируется место локализации деформаций, которое в свою очередь и приводит к полному разрушению образца даже при малых энергиях удара.

Сравнение данных ультразвуковой дефектоскопии с диаграммами ударной чувствительности подтвердило, что площадь повреждения является ключевым фактором снижения прочностных характеристик. Анализ диаграмм деформирования выявил, что предварительные удары изменяют характер кривых нагружения. При малых энергиях удара деформации локализовались в определённой зоне перед разрушением, а в момент макроразрушения распределение полей продольных деформаций было схожим для всех образцов.

Многopараметрический анализ акустической эмиссии показал, что предварительные удары различной энергии влияют на распределение ключевых параметров: пиковой амплитуды, кумулятивной энергии, количества сигналов и доминирующих частот. При квазистатическом и циклическом сжатии наибольшее количество сигналов регистрировалось в низкочастотном диапазоне, соответствующем растрескиванию матрицы. Однако при циклическом нагружении после удара высокой энергии наблюдался сдвиг в средний частотный диапазон, что указывает на активизацию ме-

ханизмов расслоения (рис.1). Анализ кумулятивной энергии продемонстрировал её значительное снижение с увеличением энергии предварительного удара, что коррелирует с уменьшением остаточной прочности.

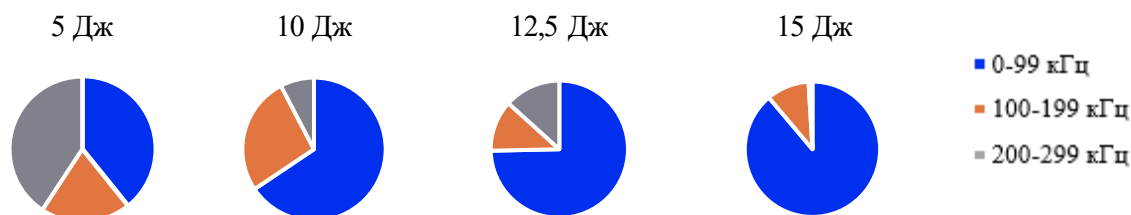


Рис. 1. Диаграммы распределения пиковых частот сигналов АЭ в испытаниях на квазистатическое сжатие

Полученные результаты позволяют оценить критический уровень ударных повреждений, при котором происходит существенное снижение несущей способности композитов. Выявленные закономерности важны для прогнозирования долговечности конструкций, работающих в условиях ударных нагрузок.

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете с использованием уникальной научной установки (УНУ) «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» <http://ckp-rf.ru/usu/501309/>.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2024-0013).

1. Староверов О.А.; Мугатаров А.И.; Чеботарева Е.А. Изучение закономерностей механического поведения слоисто-волоконистых полимерных композитов в условиях предварительных ударных и последующих квазистатических и циклических воздействий // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 4
2. O. Staroverov, A. Mugatarov, A. Kuchukov, E. Strungar, E. Chebotareva, A. Sivtseva, V. Wildemann, Influence of proportional multiaxial fatigue loading on the residual mechanical properties of glass-reinforced plastic pipes, Engineering Failure Analysis, Volume 163, Part B, 2024, 108586. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108586>
3. Lobanov D.S.; Strungar E.M.; Staroverov O.A.; Chebotareva E.A. Effect of elevated temperatures and pre-impact on residual interlayer strength of carbon fiber reinforced plastic // Problems of Strength and Plasticity. 2024. Vol. 86. № 4 DOI:10.32326/1814-9146-2024-86-4-484-497
4. O.A. Staroverov, V.E. Wildemann, A.I. Mugatarov, E.M. Strungar, and E.A. Chebotareva, "Critical States of Laminated Polymer Composite under Quasi-Static Deformation after Preliminary Low-Velocity Impact Loads," Mech. Solids. 59 (5), 3244-3253 (2024) <https://doi.org/10.1134/S0025654424606116>
5. Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С., Чеботарева Е.А. Экспериментальное изучение предельных деформаций и разрушение стеклопластиков с концентраторами напряжений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2024. - №4. - С. 98-112. doi:10.15593/perm.mech/2024.4.09

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА КИНЕТИКУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВОЛНЕ СВЧ В СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

Хина Б.Б.^{1,2}, Кулак М.М.³

¹ Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь

khina@tut.by

² Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

³ Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь

mmk_vit@mail.ru

Научно-технический прогресс требует создания не только новых материалов с широким комплексом разнообразных свойств, но и высокоэффективных технологий их производства. Одним из перспективных способов получения таких материалов является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Важнейшим направлением развития СВС является поиск эффективных путей управления процессом с целью получения материалов и изделий с заданными структурой, фазовым составом и свойствами. Эффективным способом воздействия является использование мощных ультразвуковых колебаний (УЗК). Задача расшифровки механизма горения и понимания процесса формирования конечных целевых продуктов в волне горения гетерогенных систем с наложением интенсивных УЗК представляет большой научный и практический интерес. Результаты этих исследований являются основой для успешного регулирования процессов создания материалов с заданными свойствами методом СВС в ультразвуковом поле.

В имеющихся работах по исследованию влияния ультразвуковых колебаний на процесс горения гетерогенных систем отсутствуют модели, которые бы объясняли изменение температуры и скорости горения при СВС с ультразвуком.

Поэтому целью данной работы является разработка модели, объясняющей полученные результаты. При малых числах Рейнольдса, коэффициент теплообмена α пропорционален скорости обтекания газом конденсированной фазы. Можно записать, что $\alpha \sim v$, где v – скорость относительного движения фаз (конденсированной и газообразной) (м/с). Чем больше скорость v , тем больше коэффициент теплообмена. Получаем, что коэффициент теплообмена зависит от произведения $\alpha \sim vA$. Это выражение хорошо коррелирует с экспериментальными данными: при увеличении амплитуды колебаний линейно падает температура.

При прохождении ультразвуковой волны по образцу происходит поглощение УЗ-энергии, что приводит к нагреву, однако скорость этого нагрева незначительна. 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 окончательное формирование зерен продукта. Это говорит о том, что роль теплового фактора существенна в основном в зоне догорания. В условиях СВС, когда зародыши твердого продукта образуются, как правило, за счет химического взаимодействия в высокотемпературном расплаве, существующем в зоне интенсивной реакции волны СВС, 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.

Кроме рассмотренного теплового воздействия УЗК на СВС-процесс возможно прямое, или физическое (микроскопическое) влияние ультразвука на кинетику превращений в высокотемпературной зоне волны горения. Прежде всего, воздействие УЗК на жидкости приводит к ультразвуковому капиллярному эффекту (УКЭ). При наложении УЗК на волну СВС скорость растекания возрастает вследствие УКЭ, т.е. характерное время растекания уменьшается, что должно привести к возрастанию скорости горения, но тогда процесс горения перейдет в кинетический режим.

Кинетика взаимодействия в волне СВС включает образование зародышей твердой фазы-продукта в расплаве и их последующий рост, лимитируемый диффузией в расплаве. Оба указанных “элементарных” процесса являются термически активируемыми, поэтому их суммарное действие можно охарактеризовать одной эффективной энергией активации. На микроскопическом уровне УЗК влияют как на эффективную энергию активации за счет перемешивания расплава, так и на тепловыделение за счет изменения условий зародышеобразования конкурирующих фаз в многофазной системе. При кристаллизации сплавов в ультразвуковом поле наблюдается изменение структуры слитка, выражающееся в существенном уменьшении размеров зерен. Микроскопическое (физическое) воздействие УЗК на кристаллизующийся расплав в многофазной системе приводит к изменению фазового состава твердого продукта, что наблюдалось экспериментально [1-5]. Это связано с тем, что в жидких сплавах имеются кластеры – группы атомов с ближним порядком [6], которые являются предзародышами при гомогенной кристаллизации. Строение и состав кластеров зависит от температуры и состава расплава и может изменяться под действием внешних факторов [7]. Тогда изменение состава кластеров под влиянием УЗК в бинарном или многокомпонентном 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 ультразвукового воздействия и, соответственно, к уменьшению температуры горения.

1. Клубович В.В., Кулак М.М., Румянцева И.Н. Особенности формирования объемных пористых систем при СВС – процессе. Силициды // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 5-10.
2. Клубович В.В., Кулак М.М., Румянцева И.Н. Особенности формирования объемных пористых систем при СВС – процессе. Карбиды // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 1. – С. 5-10.
3. Khina B.B., Kulak M.M. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC-metallic binder” // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 578. – P. 595-601.
4. Клубович В.В., Кулак М.М. Структурообразование тугоплавких соединений титана, получаемых методом СВС при ультразвуковых воздействиях // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2013. – № 4. – С. 80-100.
5. Клубович В.В., Кулак М.М., Хина Б.Б. Влияние мощного ультразвука на процессы горения и фазовый состав тугоплавких соединений титана при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе // Доклады НАН Беларусі. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 674-684.
6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. - Л.: Наука, 1975. - 592 с.
7. Boettinger W.J., Banerjee D.K. Solidification. In: Physical Metallurgy, 5th edition / Edited by D.E.Laughlin and K.Hono. – Elsevier, 2014, v.1, p.639-849.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Мартынов Е.М.¹, Дема Р.Р.², Железков О.С.²

¹ *Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «ННТУ «МИСИС», Старый Оскол, Россия*

² *ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия*
demar_mgtu.ru@mail.ru

Авторами работы проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на повышение износостойкости и ресурса крупногабаритных деталей винтовых механизмов металлургических машин (нажимные устройства прокатных клетей, натяжные устройства конвейеров и т.п.).

Для повышения износостойкости резьбы деталей винтового нажимного механизма (в работе рассмотрена передача «винт-гайка» листопркатного стана, для которой в соответствии с руководством по эксплуатации не допускается суммарный износ более 0,5 мм пары трения передачи «винт-гайка») предложено использовать безабразивную ультразвуковую финишную обработку (БУФО) [1-4].

Основная задача проводимых исследований заключалась в теоретическом и экспериментальном исследовании процесса обработки рабочей поверхности упорной резьбы крупногабаритных деталей винтового нажимного механизма прокатных клетей с использованием (БУФО - выглаживание с наложением ультразвуковых колебаний).

Эксперименты проводились с использованием установки БУФО-0,63/22 (конструкция Санкт-Петербургского технического университета). Для поиска рациональных технологических режимов проведена серия экспериментов, в ходе которых на токарно-винторезном станке модели 1К62 обрабатывались заготовки из стали марки 34ХН1М. Условия эксперимента: наружный диаметр заготовки: $D = 120$ мм; ширина $b = 25$ мм; шероховатость исходных образцов после токарной механической обработки $Ra\ 3,2$ мкм. Исследования микротопографии поверхностей осуществлялись с использованием высокоточного импортного оборудования: профилометра Mahr S2 (Германия) и 3D-интерферометра Bruker GT K1 (USA) в научно-исследовательском центре «Микротопография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

По результатами исследования установлено, что с увеличением начальной глубины внедрения индентора в диапазоне от 0,1 до 0,3 мм среднеарифметическое отклонение профиля $Ra\ 0,045$ мкм обеспечивается при $t = 0,3$ мм и скоростей вращения заготовки $n = 240$ об/мин. Увеличение глубины внедрения индентора от 0,15 до 0,3 мм приводит к возрастанию сил, действующих на индентор, и затрат энергии на вращение заготовки, что приводит к снижению стойкости индентора. Установлена рациональная величина глубины внедрения индентора 0,1 - 0,15 мм

Авторами определены рациональные режимы обработки: глубины внедрения индентора, скорость вращения заготовки и др. В частности установлено, что при частоте вращения заготовки в пределе 280–320 об/мин среднеарифметическое отклонение Ra принимает значение близкое к минимальным, а среднее число вершин профиля Pc на 1 см длины достигает максимального значения. Определены зависимости влияния глубины внедрения индентора t , частоты вращения заготовки n и линейной скорости V точки контакта заготовки с индентором на число вершин профиля Pc на 1 см длины. При частоте вращения заготовки в интервале 280–320 об/мин,

что соответствует линейной скорости 1,7–1,9 м/с, среднеарифметическое отклонение Ra принимает значение близкое к минимальным и составляет 0,06 мкм (рисунок 4 а). Среднее число вершин профиля Ps на 1 см длины достигает максимального значения в диапазоне 53–55 см⁻¹, что свидетельствует о высоком качестве обработки поверхности [2, 5-7].

Для повышения эффективности обработки поверхности и повышения качества рабочих поверхностей упорной резьбы гайки из бронзы марки БрО10Ф1 разработано устройство (патент на полезную модель № 208576) [8]. Экспериментально определены рациональные режимы выглаживания, обеспечивающие упрочнение резьбы на глубину 0,2 мм и шероховатость поверхности Ra не более 0,06 мкм.

Вывод по работе

Применение поверхностного выглаживания по технологии БУФО позволяет:

- повысить микротвёрдость поверхности образцов из стали марки 34ХН1М на 12 % и 19 % из бронзы БрО10Ф1; обеспечить толщину упрочненного слоя до 0,02 мм для образцов из стали марки 34ХН1М и 0,2 мм – из бронзы БрО10Ф1;
- снизить интенсивность изнашивания поверхности образцов из бронзы БрО10Ф1 на 30 % по сравнению с исходным состоянием.

1. Железков, О.С. Моделирование процесса упрочнения крупной трапецеидальной резьбы с использованием обкатки роликом / О.С. Железков, Е.М. Мартынов, Н.Н. Огарков, Б.Б. Макаров, М.В. Харченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 681-686.
2. Железков, О.С. Рациональные режимы выглаживания поверхности с использованием ультразвуковой финишной обработки / О.С. Железков, П.А. Дьяков, Е.М. Мартынов и др. // Вестник машиностроения. – 2022. – № 6. – С. 84-88.
3. Железков, О.С. Прогнозирование износостойкости гайки нажимного устройства прокатной клетки / О.С. Железков, Р.Р. Дема, М.В. Харченко, И.И. Кинзина, Е.М. Мартынов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2022. – № 6. – С. 24-28.
4. Разработка методики прогнозирования износостойкости резьбовых элементов винтовых передач / Е.М. Мартынов, О.С. Железков, М.В. Харченко [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2024. – № 5. – С. 232-238.
5. Martynov, E.M. Searching for a rational schedule of a burnishing process with superimposition of ultrasonic vibrations / E.M. Martynov, O.S. Zhelezkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Sevastopol, 2020. – P. 32-37.
6. Martynov, E.M. Searching for a rational schedule of a burnishing process with superimposition of ultrasonic vibrations / E.M. Martynov, O.S. Zhelezkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – № 3: Materials Science. – (International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE-2020), Sevastopol, Crimea, 7-11 September 2020).
7. Zhelezkov, O.S. Optimizing the Ultrasound Finishing of Surfaces (Оптимизация ультразвуковой финишной обработки поверхностей) / O.S. Zhelezkov, P.A. D'yakov, E.M. Martynov, S.P. Nefed'ev, M.V. Kharchenko // Russian Engineering Research this link is disabled. – 2022. – 42(9). – P. 920-924.
8. Патент на полезную модель № 208576 U1 Российская Федерация, МПК В24В 39/02. Устройство для ультразвукового выглаживания крупной внутренней упорной резьбы: № 2021108739: заявл. 31.03.2021: опубл. 24.12.2021 / О.С. Железков, Е.М. Мартынов, Р.Р. Дема; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – 6 с.

ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАРБОНАТНОМ КОЛЛЕКТОРЕ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Марфин Е.А.

ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

marfin_ea@mail.ru

Исследования процессов фильтрации в карбонатных коллекторах являются актуальными, поскольку такие породы имеют низкую проницаемость и сложную структуру, а это сильно затрудняет извлечение из них нефти. Улучшение фильтрационных процессов позволяет повысить нефтеотдачу и экономическую эффективность разработки нефтяных месторождений. Существующие основные подходы к улучшению фильтрации в карбонатных коллекторах включают химическое и тепловое воздействие, гидроразрыв пласта. Эти методы направлены на изменение структуры поровых каналов для ускорения потока жидкости. Ультразвуковое воздействие представляет собой инновационный подход, который способен интенсифицировать процесс фильтрации [1-2]. В качестве основных механизмов воздействия ультразвуковых колебаний на насыщенные пористые среды рассматривают увеличение их проницаемости [3-5] и снижение вязкости углеводородных жидкостей [6]. Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании влияния ультразвукового воздействия на процесс фильтрации в образцах карбонатных коллекторов.

Объектами исследования в данной работы были образцы карбонатных коллекторов длиной 50 мм и диаметром 30 мм. Фильтрационно-емкостные свойства образцов исследованы в Казанском федеральном университете на анализаторе газопроницаемости и пористости ПИК-ПП (АО «Геологика»). Значения пористости исследуемых образцов варьировались от 11,5% до 16,8% при значениях проницаемости от 439 до 1994 мД.

Экспериментальные исследования процесса фильтрации проводились на установке, схема которой представлена на рисунке 1. В качестве фильтруемой жидкости использовался 20% раствор NaCl в дистиллированной воде. Исследуемый пористый образец (3) размещался в силиконовой манжете, стянутой силовыми хомутами для обеспечения герметичности. Для осуществления процесса фильтрации создавался постоянный перепад давления, создаваемый компрессором (1) и расширительным баком (2), который контролировался образцовым манометром. Ультразвуковое воздействие на процесс фильтрации осуществлялось в проточной ультразвуковой ванне (4), где в качестве излучателя колебаний использовался ультразвуковой преобразователь аппарата «Волна» УЗТА-0,4/22-ОМ. Частота воздействия составляла 22 кГц. Интенсивность воздействия задавалась в диапазоне 40-100% от максимальной (11,7 Вт/см²). Расход фильтрующейся жидкости определялся при помощи непрерывного измерения ее массы на электронных весах (5) Масса-К ВК-300 () с точностью $\pm 0,01$ грамма. Запись показаний весов осуществлялась на компьютер (6) с шагом 1 с. Оценка влияния ультразвукового воздействия осуществлялась по линейному закону Дарси.

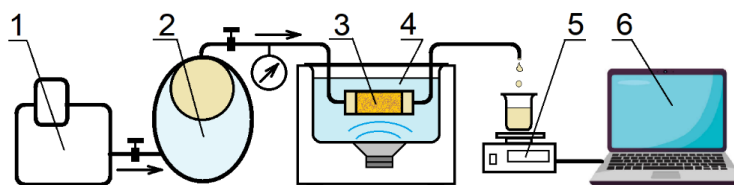


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Основной гипотезой влияния ультразвуковых колебаний на процесс фильтрации в данной работе является следующее. При распространении в насыщенной пористой среде упругая волна поглощается. В отсутствии фильтрации жидкости поглощенная звуковая энергия расходуется на нагрев. Если имеет место фильтрация, то некоторая часть поглощенной звуковой энергии расходуется на увеличение коэффициента фильтрации (отношение коэффициента проницаемости к вязкости жидкости), что при постоянном перепаде давления на пористом образце должно увеличить расход жидкости. Эффективность воздействия зависит от интенсивности ультразвукового воздействия и градиента давления на образце.

Проведенные экспериментальные исследования с различными образцами пористых сред показали увеличение расхода жидкости при воздействии ультразвука. Сравнивались значения коэффициента фильтрации без воздействия и при ультразвуковом воздействии. Было установлено следующие закономерности. При увеличении интенсивности ультразвука эффект воздействия увеличивается. Чем меньше начальная проницаемость пористого образца, тем больше эффективность воздействия. Эффект увеличения коэффициента фильтрации тем выше, чем меньше градиент давления. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными, представленными в работах [4, 5].

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования ультразвукового воздействия для улучшения фильтрационных процессов в карбонатных коллекторах. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования различных режимов акустического воздействия на добычу нефти с целью повышения эффективности разработки нефтяных месторождений.

** Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение №71/2024-ПД).*

1. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. V. 158. P. 529-534.
2. Hamidi H., Haddad A.S. [et al.] Recent applications of ultrasonic waves in improved oil recovery: A review of techniques and results // Ultrasonics. 2021. V. 110. 06288.
3. Гатауллин Р.Н., Галимзянова А.Р., Марфин Е.А. Влияние акустического воздействия на проницаемость пористых сред (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 10. С. 186-202.
4. Elkhoury J.E., Niemeijer A. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2011. V. 116 (2). B02311.
5. Riabokon E., Gladkikh E. [et al.] Effects of ultrasonic oscillations on permeability of rocks during the paraffinic oil flow // Géotechnique Letters. 2023. Vol. 13 (3). P. 1-7.
6. Galimzyanova A.R., Gataullin R.N. [et al.] Elucidating the impact of ultrasonic treatment on bituminous oil properties: A comprehensive study of viscosity modification // Geoenergy Science and Engineering. 2024. Vol. 233. P. 212487.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКИ ПОЛИМЕРОВ В ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р., Сливин А.Н.

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

roman@bti.secna.ru

В настоящее время ультразвук (УЗ) применяется при инициации и интенсификации технологических процессов во многих отраслях промышленности. Особый интерес представляет использование ультразвуковых колебаний как инструмента эффективной реализации сварки полимерных материалов [1–2].

В отличие от более традиционных подходов к сварке полимеров (например, термосварки) ультразвуковая сварка позволяет сваривать материалы за счёт локального нагрева трением от УЗ колебаний до температуры плавления. На скорость протекающего процесса и прочность сварного соединения также оказывают значительное влияние диффузионные процессы, ускоренные УЗ колебаниями [3].

Процесс ультразвуковой сварки сопровождается рядом сопутствующих эффектов, исследование которых позволит разработать подходы к наиболее эффективному УЗ воздействию на соединяемые полимеры и в полной мере раскрыть потенциал технологии УЗ сварки.

В рамках данной работы авторами был разработан стенд для исследования характера осадки полимерных материалов в процессе воздействия на них УЗ колебаний, что позволяет оценить вклад гидродинамических эффектов (кавитационных явлений, акустических микропотоков и т.п.).

Структурная схема разработанного стенда представлена на рисунке 1.

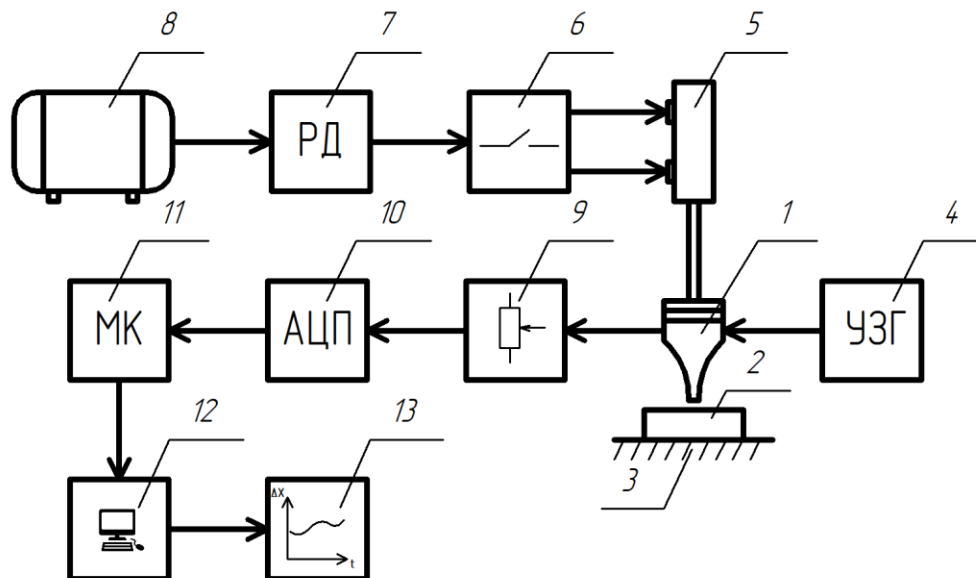


Рис. 1. Структурная схема измерительного стенда

1 – ультразвуковая колебательная система с рабочим инструментом; 2 – исследуемый образец; 3 – металлическая опора; 4 – ультразвуковой электронный генератор; 5 – пневматический привод для перемещения ультразвуковой колебательной системы; 6 – пневматическая педаль; 7 – регулятор давления с манометром; 8 – компрессор; 9 – датчик перемещения, жестко соединенный с УЗКС; 10 – аналогово-цифровой преобразователь; 11 – микроконтроллер; 12 – персональный компьютер; 13 – программное обеспечение для визуализации полученных зависимостей

Разработанный стенд был изготовлен и апробирован. Установка обеспечивает ультразвуковые колебания амплитудой в диапазоне 5...40 мкм при частоте воздействия 35 кГц и позволяет контролировать деформации свариваемых образцов в диапазоне 5мм.

На рисунке 2 представлена кривая деформации тестового образца.

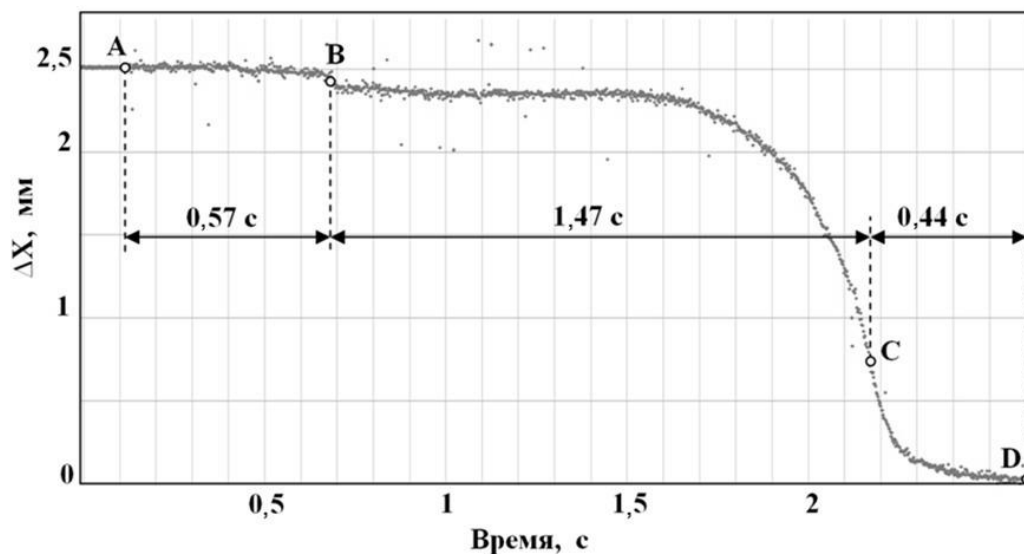


Рис. 2. Зависимость деформации твердого полимера от времени УЗ воздействия

Точка А соответствует началу УЗ воздействия. Точка В соответствует моменту начальной осадки материала. На отрезке ВС происходит размягчение и переход полимера из твердого состояния в пластичное и далее в текучее состояние. Точка С соответствует точке максимальной скорости деформирования материала. Далее скорость деформации замедляется, что связано с устремлением ΔX к нулю и затруднением истечения из него расплавленного материала. Точка D соответствует точке полного вытеснения расплавленного полимера из области УЗ воздействия.

Таким образом, измерительный стенд позволяет получать кривые, иллюстрирующие характер осадки полимерных материалов в процессе воздействия на них УЗ энергии, что в перспективе обеспечит изучение новых механизмов инициации взаимной диффузии полимеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00314, <https://rscf.ru/project/24-22-00314/>.

1. Benatar A., Marcus M. Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. Power Ultrasonics (Second Edition). 2023. P. 205–225.
2. Волков С.С., Ремизов А.Л., Коновалов А.В., Неровный В.М. Параметры режима ультразвуковой сварки полимерных материалов. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 4(757). С. 21–29.
3. Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Симонов Д.С., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения. Научно-технические технологии электро-физикохимической и комбинированной обработки. 2020. № 9. С. 21–26.

ТРАНСФОРМАТОР ОДНОПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Борисенко Д.Н., Жохов А.А., Редькин Б.С.

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН,

Черноголовка, Россия

bdn@issp.ac.ru

Известно, что трансформация импульсов электроэнергии однополярного тока затруднительна по причине насыщения рабочей индукции магнитопровода трансформатора в соответствии с кривой намагничивания для данного материала. При небольшой мощности (например, управляющие сигналы на базу/затвор силовых транзисторов) возможна передача энергии с помощью трансформатора без существенных потерь полезного сигнала по частной петле намагничивания вблизи области насыщения магнитопровода, при этом индукция изменяется в пределах от остаточной B_r до (в пределе) индукции насыщения B_s . Схематично частная петля намагничивания показана на рис. 1 заштрихованной областью. У самых лучших представителей класса ферромагнетиков остаточная индукция примерно равна половине индукции насыщения [1]. В таких условиях работы магнитопровод трансформатора работает наименее эффективно. Для одноктактных преобразователей предложенные схемы трансформации однополярного тока сильно ограничивают регулировочные характеристики источников силового электропитания, и требуют введения в схему дополнительных элементов для защиты силовых транзисторов от потенциального пробоя вследствие возникновения ЭДС самоиндукции. Поэтому необходима разработка простых способов снижения остаточной индукции в магнитопроводе силового трансформатора без значительного усложнения схем.

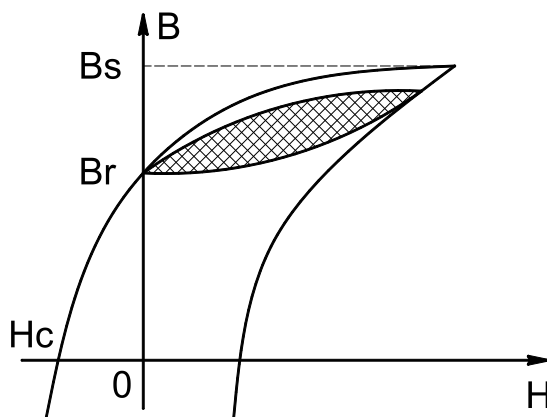


Рис. 1. Частная петля намагничивания

В процессе развития импульсной электротехники наиболее интересные технологические решения этой проблемы предлагались в цепях двуполярного тока, где явление насыщения рабочей индукции магнитопровода имеет ту же природу, и объясняется подмагничиванием сердечника силового трансформатора кратковременными постоянными токами, возникающими из-за асимметрии импульсов, вызванной рядом причин схмотехнического характера. Введение обратной связи по потоку рассеяния или току намагничивания силового трансформатора реализовано в импульсном преобразователе напряжения [2, 3]. В этом случае, при увеличении тока подмагничивания, коррекция длительности управляющих импульсов производится в каждом такте управления. Такое схемное решение связано со значительными сложностями измерения контролируемых параметров (потока рассеивания и

тока подмагничивания). При значительной асимметрии импульсов, вызванной разбросом параметров силовых транзисторов, ошибок монтажа ВЧ дросселей и топологии печатных плат, рост тока через первичную обмотку трансформатора может происходить с большой скоростью, и тогда ограничение длительности импульсов не успевает скорректировать асимметрию, компаратор отключает силовой каскад, что приводит к нарушению нормального режима работы преобразователя. Таким образом, наличие значительной инерционности переходных процессов в цепях обратной связи может приводить к выходу из строя силовых ключей и аварийным ситуациям. Устранение асимметричного режима работы трансформатора путем введения немагнитного зазора [4] – является эффективным техническим решением в борьбе с подмагничиванием магнитопровода и позволяет уменьшить смещение частного цикла петли намагничивания при воздействии значительных асимметрий. Размагничивающий эффект зазора, приводит к сдвигу петли гистерезиса и заметному снижению магнитной проницаемости магнитопровода при уменьшении остаточной индукции, в связи с этим значительно увеличивается полезный размах индукции. Малые величины зазора фактически не влияют на потери в магнитопроводе, однако оказывают необходимый размагничивающий эффект, исключая быстрое насыщение магнитопровода при действии однополярного тока. Такое устройство магнитопровода трансформатора наиболее простое, однако снизить остаточную индукцию до нуля и полностью устранить ток подмагничивания не удастся, вследствие чего приходится увеличивать запас рабочей индукции по отношению к индукции насыщения, которая должна включать постоянный уровень, обусловленный током подмагничивания. Поэтому разработка трансформатора однополярных импульсов напряжения с нулевой остаточной индукцией магнитопровода для гальванической развязки в источниках питания ультразвуковых генераторов, высокочастотной дуги и электроэрозионной обработки поверхности является актуальной задачей.

В предлагаемой авторами конструкции трансформатора результат достигается за счет использования неодимового магнита с коаксиальным расположением полюсов и оси магнитопровода таким образом, что вектор индукции неодимового магнита ориентирован навстречу вектору индукции однополярного тока, протекающего в обмотках трансформатора, и служит для снижения остаточной индукции магнитопровода B_r до нуля и увеличения КПД трансформатора. Возможные варианты увеличения рабочих токов более 10 А обсуждаются в докладе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН.

1. Силовая электроника от простого к сложному / Семёнов Б.Ю. - М.: СОЛОН-Пресс, 2005. - 419 с.
2. И.В. Фомин // Патент РФ № 2035833 от 20.05.1995.
3. Тупиков Н.Г. и др. // Патент РФ № 2410829 от 27.01.2011.
4. Б. Гусев, Д. Овчинников / Мостовой преобразователь с удвоителем тока при подмагничивании сердечника трансформатора // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2005. Вып. 5.

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В.

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

Бийск, Россия

grey@u-sonic.ru

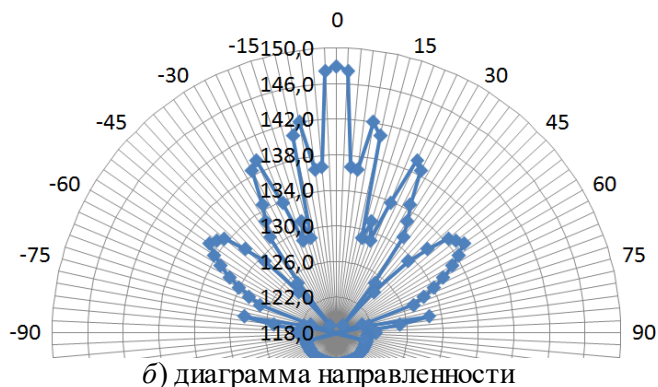
В настоящее время существует потребность в применении воздействия ультразвуковыми (УЗ) колебаниями для интенсификации таких процессов, как коагуляция твердых и жидких частиц в газовых средах при улавливании создаваемых мелкодисперсных материалов и очистки газов; сушка легкоокисляемых и взрывчатых веществ и материалов; пеногашение при производстве и упаковке пенящихся продуктов. Известно, что для интенсификации процессов в газовых средах необходимо создавать УЗ колебания с частотой более 20 кГц (для обеспечения безопасности персонала) и уровнем звукового давления более 145 дБ [1-4].

Для реализации такой технологии был спроектирован, рассчитан с помощью метода методом конечных элементов и изготовлен УЗ излучатель с изгибно-колеблющегося диском переменного сечения непрерывной формы. Дискосый излучатель имеет области, которые совершают колебания в противоположной фазе: одни совершает колебания в одной фазе, а другие – в противоположной.

Для исключения этого негативного эффекта и использования обратной стороны дискосого излучателя были разработаны специальный отражатель, конусные выравниватели фазы и рупоры (рис. 1, а) [5].



а) внешний вид



б) диаграмма направленности

Рис. 1. Диаграмма направленности излучателя с отражателем и рупором

Измерение уровня звукового давления осуществлялось с помощью шумомера Экофизика-110А, оснащенного направленным микрофоном. Измерения показали (рис. 1 б), что угол раскрытия основного лепестка составил 7,5°, уровень звукового давления на расстоянии один метр – 148,5-149 дБ, частота воздействия – 22,5 кГц.

Созданный УЗ дискосый излучатель имеет массу около одного кг, и может использоваться как переносное устройство.

Для дальнейшего увеличения уровня создаваемого звукового давления была предложена концепция создания многоэлементного УЗ излучателя в виде массива отдельных УЗ дискосых излучателей (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид разработанного многоэлементного УЗ излучателя

Конструкция представляет собой раму, на которой закреплены несколько УЗ дисковых излучателей. Крепление осуществляется попарно, на подвижной основе, позволяющей изменять расстояние между парами излучателей. Такой подход позволит сформировать направленное УЗ излучение: как по вертикальной, так и по горизонтальной плоскости.

Питание многоэлементного УЗ излучателя осуществляется при помощи специального многоканального электронного генератора.

Выводы

Представленные в работе результаты исследований позволили разработать и изготовить специализированный УЗ излучатель, способный обеспечивать высокоинтенсивное УЗ воздействие через газовые промежутки (уровень звукового давления 148-149 дБ на расстоянии один метр от излучателя при частоте воздействия в 22,5 кГц).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

1. Степкина, М.Ю. Скорости осаждения мелкодисперсных аэрозолей в акустическом и электрическом поле / М.Ю. Степкина, О.Б. Кудряшова, А.А. Антонникова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 3. – С. 62-68.
2. Анисимова, К.В. Интенсификация безвакуумной сублимационной сушки плодов за счет звукового поля / К.В. Анисимова, О.Б. Поробова, А.Б. Анисимов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 2(100). – С. 103-106.
3. Хмелев, В.Н. Излучатели для создания высокоинтенсивных ультразвуковых полей в газодисперсных системах / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.Н. Голых // Ползуновский вестник. – 2017. – № 3. – С. 85-90.
4. Хмелев, В.Н. Ультразвук. Газоочистка / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров. – Бийск, Изд-во: Алт. госуд. технич. ун-т им. И.И. Ползунова, 2018. – 534 с.
5. Ультразвуковая колебательная система для газовых сред: патент 2822084. РФ: МПК В06В 1/06 (2024.01) / Хмелёв Владимир Николаевич, Шалунов Андрей Викторович, Нестеров Виктор Александрович, Цыганок Сергей Николаевич, Терентьев Сергей Александрович, Синкин Александр Андреевич; правообладатель – ООО «Центр ультразвуковых технологий», заявка: 2024107663, 22.03.2024 Опубликовано: 01.07.2024.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ШВОВ

Хмелев В.Н.¹, Нестеров В.А.¹, Генне Д.В.¹, Сливин А.Н.¹, Цыганок С.Н.¹,
Хмелев М.В.²

¹Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Россия

²ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск, Россия

grey@u-sonic.ru

При производстве термопластичных листовых и пленочных материалов возникает необходимость их соединения между собой для увеличения общей длины или ширины заготовки, формирования рулонов нужной длины, изготовления изделий (тентов, мешков, чехлов и т.п.).

Известно, что ультразвуковая (УЗ) сварка позволяет получать протяженные швы. При таком способе колебания УЗ частоты воздействуют на термопластичные материалы и, значительно ускоряя диффузионные процессы, обеспечивают взаимное проникновение их и формирование высокопрочного (до 80% от прочности материала) сварочного шва [1-4].

Для формирования непрерывного соединения двух пленочных и листовых материалов различной толщины и структуры для исключения неоднородностей шва (коробление, морщинивание и т.п.) используется сварочная опора в виде вращающего (тянущего) ролика, как с 3D-рисунком, так и без [5].

На рисунке 1 представлено созданное УЗ оборудование для формирования швов различной длины (до 2000 м), использующееся, например, при соединении геотекстильных тканей.



Рис. 1. Аппарат для формирования протяженных швов длиной до 2000 мм

Особенностью созданного оборудования является возможность получения швов различной ширины (до 5 мм), а также регулировка скорости формирования сварочного шва для обеспечения заданной прочности.

Для реализации удержания сформированного шва непосредственно сразу после прекращения УЗ воздействия необходимо использовать технологию получения сварочных швов с помощью шовно-шагового метода [6]. Для этих целей, а именно для УЗ сварки пористых и неоднородных материалов, создано УЗ оборудование на базе аппарата серии «ГИМИНЕЙ-Ш», реализующее данный метод (рис. 2).

Подобное оборудование применяется при УЗ сварке листовых термопластичных материалов, используемых в строительстве.

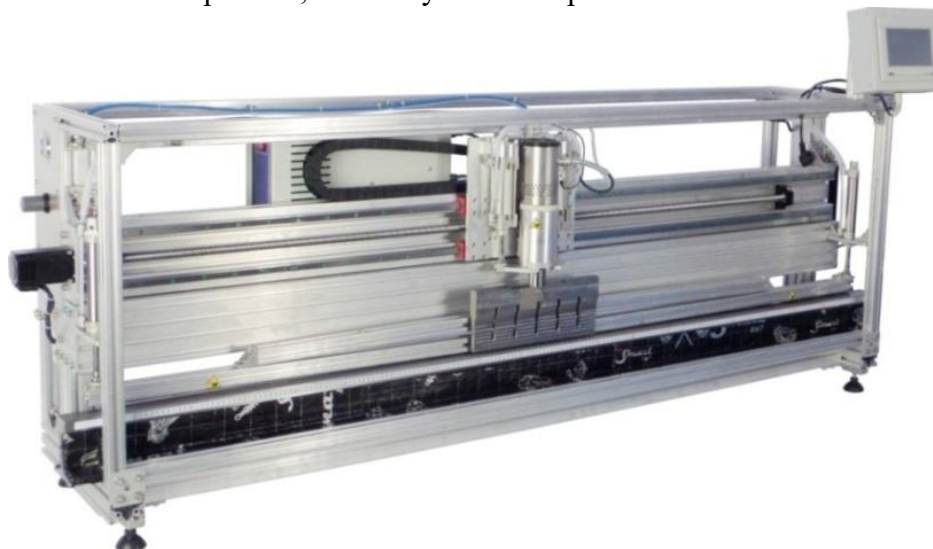


Рис. 2. Аппарат для формирования протяженных швов до 1700 мм методом с подвижной ультразвуковой колебательной системой

Отличительной особенностью созданного оборудования является формирование за один цикл сварки шва длиной 270-320 мм для достижения максимальных прочностных характеристик.

Выводы

Создано УЗ сварочное оборудование, которое может быть предложено для реализации разных производственных задач или положено в основу новых разработок.

1. Пятаев, Д.А. Ультразвуковая сварка различных материалов / Д.А. Пятаев, Д.С. Кайзер, М. А. Зимин // Научный аспект. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 339-342.
2. Хмелев, В.Н. Контроль качества шва, формируемого при ультразвуковой сварке термопластичных материалов / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов, М.Е. Вакар // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 69-72.
3. Волков, С.С. Ультразвуковая сварка полимерных пленок / С.С. Волков, В.М. Неровный, Г.А. Бигус // Пластические массы. – 2019. – № 11-12. – С. 59-62.
4. Клубович, В.В. Ультразвуковая сварка полимеров / В.В. Клубович, В.А. Клушин, В.И. Марусич, Е.В. Хрущев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сборник научных трудов в 3 книгах. Том Книга 1. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. – С. 130-136.
5. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая сварка с использованием вращающихся сварочного инструмента и роликовой опоры / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2015. – № 3(11). – С. 38-43.
6. Хмелев, В.Н. Разработка сварочного инструмента для формирования протяженных швов методом прессовой ультразвуковой сварки / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, А.Н. Сливин // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 2018. – Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. – С. 311-316.

ДВУХЧАСТОТНОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЛЯ КОАГУЛЯЦИИ ДЫМА

Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Данилов П.Д.

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

Снижение видимости при пожарах, вызванное образованием большого количества продуктов горения (дым, окись углерода и т.д.), существенно ограничивает возможность эвакуации людей и снижает скорость ликвидации огня. Существующие системы дымоудаления, основанные на приточной вентиляции помещения [1], неэффективны, так как потоки свежего воздуха могут ускорить горение. Распыление высокодисперсного водяного тумана может временно улучшить видимость на короткий промежуток времени (несколько минут), но, в дальнейшем, видимость снова снижается до более низких значений за счет поглощения и рассеяния света на мелких каплях воды [2].

Неэффективность существующих методов определяет необходимость поиска новых, нетрадиционных способов борьбы с задымлением. Известно, что дым представляет собой тонкодисперсную взвесь твердых и жидких (смолянистых) частиц продуктов горения. Поэтому повышение эффективности осаждения дыма может быть обеспечено за счет применения дополнительного физического воздействия на частицы дыма – коагуляции ультразвуковыми (УЗ) колебаниями [3]. Однако, эффективность УЗ коагуляции доказана при воздействии на относительно крупные частицы 3...5 мкм, в то время как частицы дыма имеют размер менее 1 мкм. Для повышения эффективности коагуляции тонкодисперсных частиц были предложены различные способы, основанные на формировании нелинейно искаженных волн, инициировании акустических течений различного масштаба и д.р. К сожалению, практическая реализация этих подходов возможна только при условии резонансного усиления колебаний в малых объемах или слоях.

Поэтому большой интерес представляет исследование влияния двухчастотного УЗ воздействия, способного: 1) придавать дымовым частицам вращательное движение, увеличивающее вероятность их столкновения; 2) осаждать образовавшиеся агломераты низкочастотными биениями, формируемыми за счет взаимодействия близких по частоте колебаний [4]. Было проведено сравнение скорости осаждения при воздействиях на дым двумя излучателями на равных и отличающихся частотах. Для этого были разработаны и изготовлены изгибно-колеблющиеся ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи с дисковыми излучателями переменного сечения. Для обеспечения разночастотного воздействия на дым было изготовлено два излучателя с разными резонансными частотами (22785 Гц и 23080 Гц). Для воздействия на одной частоте использовались два излучателя с одинаковой частотой (22785 Гц) и фазовой синхронизацией.

При проведении экспериментов в камеру размером 0,3 м х 0,3 м х 2,0 м непрерывно с нижнего торца подавался дым (производительность 5 л/мин). После заполнения камеры дымом были включены УЗ излучатели, размещенные на верхнем торце камеры. При помощи оптических датчиков, установленных в дымовой камере, был измерен (относительно незадымленного воздуха в помещении) коэффициент светопропускания на различных расстояниях от излучателей. Зависимости изменения коэффициента светопропускания для каждого типа воздействия (на одной частоте и разночастотного) приведены на рис. 1. На этом рисунке графиками 1, 2, 3 показаны зависимости коэффициента пропускания света для двух дисков, работающих на

одной частоте, а графиками 4, 5, 6 – для разночастотных дисков. В каждом эксперименте сравнивались сигналы с 3-х датчиков, расположенных на расстояниях 0,25 м, 1 м и 2 м от излучателей. Уровень звукового давления в дымовой камере составлял в среднем 145 дБ.

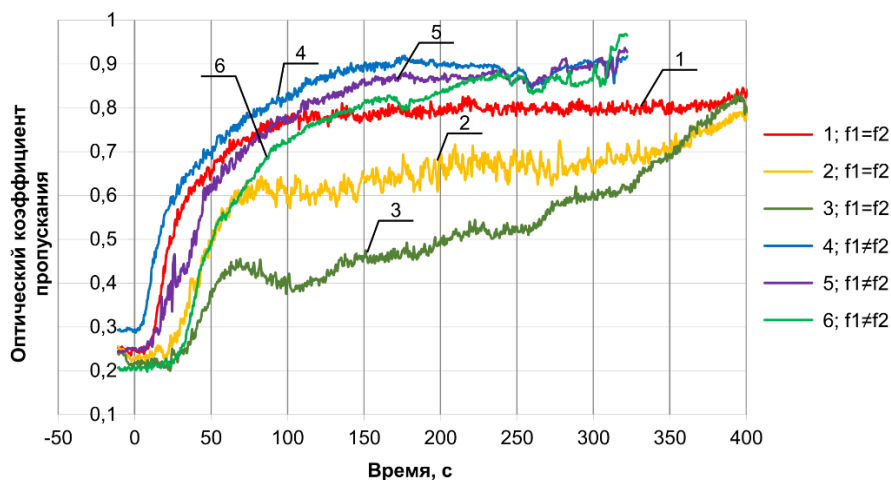


Рис. 1. Измерение коэффициента светопропускания от времени ультразвукового воздействия для различных расстояний от излучателей

Полученные результаты подтвердили эффективность двухчастотной УЗ коагуляции дыма, а именно: коэффициент светопропускания на расстоянии 1 м составил 0,9, а на 2 м – 0,8 (в сравнении с одночастотным воздействием двумя излучателями 0,65 и 0,5). Полное осаждение частиц дыма происходило в 1,6 раза быстрее в сравнении с одночастотным воздействием. Таким образом, УЗ двухчастотное воздействие не потребовало увеличения энергетических затрат на повышение эффективности коагуляции дыма, так как не только обеспечило формирование агломератов дымовых частиц под действием колебаний УЗ частоты, но и обусловило дальнейшее объединение сформированных агломератов за счет придания им вращательного движения при помощи низкочастотных колебаний.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности повышения эффективности коагуляции дыма разночастотным УЗ воздействием, по сравнению с одночастотным, и могут быть рекомендованы для создания практических способов и конструкций излучателей для борьбы с задымлением при пожарах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>.

1. Hung, H.-Y.; Lin, C.-Y.; Chuang, Y.-J.; Luan, C.-P. Application Development of Smoke Leakage Test Apparatus for Door Sets in the Field. *Fire* 2022, 5, 12.
2. Kuznetsov, G.V.; Piskunov, M.V.; Strizhak, P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests. *Int. J. Therm. Sci.* 2017, 121, 398–409.
3. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Нестеров В.А., Данилов П.Д. Ультразвуковой излучатель для осаждения дымов при эвакуации людей и ликвидации пожаров. *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 1. С. 52-58.
4. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Генне Д.В. Способ осаждения дыма, Патент РФ 2835844, 2025 г.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ УДАЛЕНИЕ ВЛАГИ УЛЬТРАЗВУКОМ

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

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

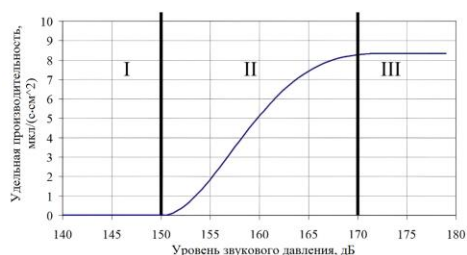
sergey@bti.secna.ru

Ультразвуковое (УЗ) воздействие является перспективным способом низкотемпературной сушки термолабильных и легкоокисляемых капиллярно-пористых материалов [1]. Однако, из-за недостаточного количества УЗ энергии, вводимой в высушиваемый материал для перевода жидкости в пар не удастся создать промышленные УЗ сушилки для значительного объема материала.

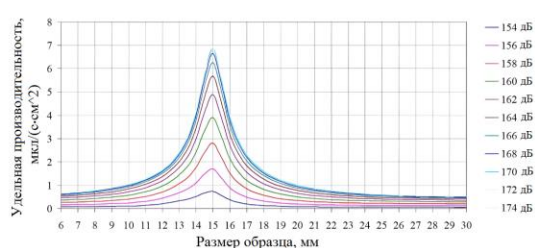
Проведенные ранее исследования позволили обнаружить явление эффективного «выбивания» влаги из ткани за счет УЗ распыления. В частности, в ряде экспериментов по сушке пробкового материала, картофеля, красной свеклы было установлено, что при воздействии УЗ колебаниями с уровнем звукового воздействия более 150 дБ приводит к скачкообразному росту скорости сушки при равномерном увеличении энергии воздействия.

Для определения функциональных возможностей и установления режимов воздействия, способных обеспечить удаление влаги из капиллярно-пористого материала в капельном виде (без фазового перехода) были проведены исследования процесса сушки за счет воздействия УЗ колебаниями высокой интенсивности на частицы материала резонансных размеров [2].

Механизм УЗ удаления влаги из материала с учётом полного жизненного цикла кавитационного пузырька в капиллярах впервые был проанализирован теоретически. Проведённый анализ удаления влаги за счет схлопывания кавитационных пузырьков цилиндрической формы позволил подтвердить теоретическую возможность его практической реализации при воздействии колебаниями с уровнем звукового давления 150-170 дБ. Проведенные расчеты показали, что при таком давлении зависимость производительности сушки от уровня звукового давления близка к линейной. Кроме того, теоретически установлено существование предельного уровня давления (170 дБ), при котором прекращается рост производительности сушки за счёт того, что, в части капилляров, кавитационные пузырьки достигают максимального размера, равного размеру капилляра, и схлопывания не происходит. При дальнейшем повышении уровня давления доля таких капилляров увеличивается и сдерживает рост производительности сушки. В ходе теоретических исследований установлена зависимость производительности сушки от размера образца. Показано, что оптимальный размер образца обезвоживаемого материала должен соответствовать длине УЗ волны в газовой фазе (рис. 1).



зависимость удельной производительности сушки от уровня звукового давления



зависимость удельной производительности сушки от размера образцов высушиваемого материала

Рис. 1. Зависимости удельной производительности сушки

Для подтверждения результатов исследований и практической реализации УЗ суши, разделенных на частицы оптимального размера, были спроектированы барабанные сушилки горизонтального и вертикального типа.

Структурные схемы разработанных сушилок горизонтального [3] и вертикального [4] типов представлены на рисунке 2.

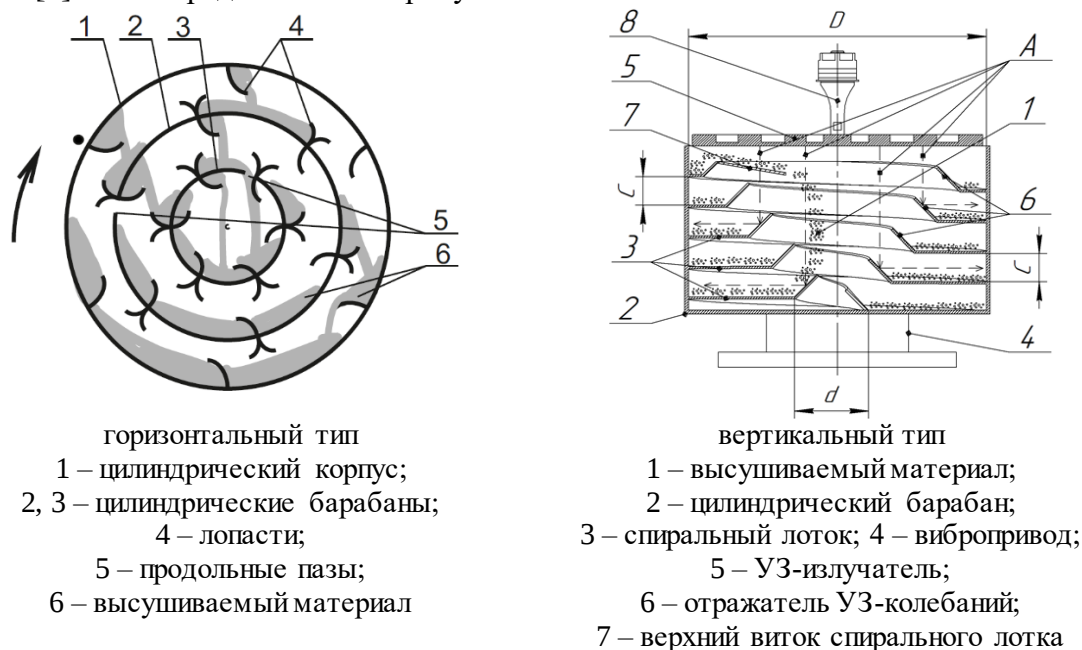


Рис. 2. Структурные схемы ультразвуковых барабанных сушилок

В сушилках обеспечивается пересыпание частиц высушиваемого материала оптимального размера, что позволяет повысить эффективность его сушки при воздействии УЗ колебаниями с уровнем давления более 150 дБ. Результаты сушки кубиков картофеля показали не только ускорение процесса УЗ сушки на 40-44%, но и сокращение затрат энергии до 20% в сравнении с конвективной сушкой при неизменных аэродинамических условиях.

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

1. Верболоз Е.И., Иванова М.А., Демченко В., Фартуков А.С., Евона Н.К. Исследование процесса сушки шиповника в поле действия ультразвука. Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50, № 1. С. 79-86.
2. Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А., Голых Р.Н., Нестеров В.А. Выявление и исследование механизма удаления влаги из материалов при ультразвуковом бесконтактном воздействии. Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 4. С. 939-950.
3. Пат. № 2751423. РФ. Способ ультразвуковой сушки сыпучих материалов / С.А. Терентьев, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, П.П. Тertiшников.
4. Пат. № 2757201. РФ. Способ ультразвуковой сушки сыпучих материалов / С.А. Терентьев, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, П.П. Тertiшников.

ОЦЕНКА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Баранникова С.А., Исхакова П.В.

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*
bsa@ispms.ru

Расширение применения алюминиевых сплавов в ряде областей техники связано с более глубоким и всесторонним исследованием их акустических свойств, характеризующих распространение упругих колебаний. К акустическим свойствам относятся скорость распространения упругих колебаний или скорость звука, а также затухание упругих колебаний и ряд производных характеристик. Исследование акустических свойств представляет интерес как для ультразвуковой дефектоскопии различного рода полуфабрикатов, так и для исследований процессов, происходящих в структуре металлов и сплавов [1-3]. Целью настоящего исследования является поиск фундаментальных закономерностей изменения скорости распространения ультразвука и способ оценки микроскопических параметров пластического течения.

В работе в качестве материала использован поликристаллический ГЦК металл: технически чистый алюминий ($Al \geq 99,5$ мас.%) с размером зерна ~ 40 мкм. Плоские образцы с размерами рабочей части $40 \times 5 \times 2$ мм испытывали на машине “Instron-1185” со скоростью $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Одновременно с регистрацией кривых нагружения производилась запись изменения скорости ультразвуковых волн в Al [2, 3]. Испытания были проведены в интервале температур $173 \leq T \leq 350 \text{ K}$, которые достигались либо продувкой рабочей камеры парами азота из сосуда Дьюара, скорость продувки регулировалась нагревательным элементом, расположенным внутри сосуда Дьюара, либо продувкой рабочей камеры нагретым воздухом.

В работе экспериментально исследовано термически активированное изменение показателей прочности и пластичности в образцах ГЦК металла. Установлен сложный характер изменения скорости распространения ультразвука вдоль кривой пластического течения поликристаллов Al. Зависимости скорости рэлеевских акустических волн от величины общей деформации и действующего напряжения являются многостадийными, и их характерные участки надежно разделяют деформационную кривую на отдельные стадии. Проведена численная оценка общей плотности дислокаций в процессе растяжения по данным изменений скорости распространения ультразвуковых волн.

Проведенные исследования пластической деформации с использованием методики измерения распространения ультразвуковых волн позволили изучить процессы деформирования “in situ” и выявить дополнительные закономерности деформационного упрочнения поликристаллического алюминия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0011.

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
3. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Лунев А.Г. От макро к микро. Масштабы пластической деформации. – Новосибирск: Наука, 2018. – 132 с.

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА И МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Неверов А.Н., Селиверстова О.В.

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

Вопросу согласования ультразвуковых генераторов с преобразователями посвящено во множестве работ [1]. В настоящей работе рассматриваются связанные колебания генератора и магнитострикционного преобразователя.

Рассмотрим колебания простейшей системы, состоящей из магнитострикционного стержня (МСС) длиной l и ультразвукового генератора (рис. 1). Генератор аппроксимируем источником колебаний с конденсатором C , который предназначен для согласования генератора с нагрузкой – магнитострикционным стержнем [1]. Ка-

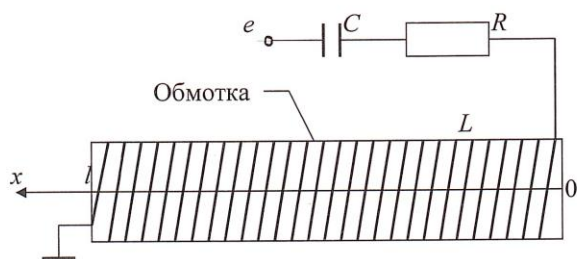


Рис. 1. Расчетная схема

тушка контура представляет собой обмотку МСС с индуктивностью L и сопротивлением R .

Исходные уравнения для расчета:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}; \quad (1)$$

$$u_C + u_R + u_L = e; \quad (2)$$

$$\sigma = E\varepsilon - \Lambda H; \quad (3)$$

$$B = \Lambda \varepsilon + \mu \mu_0 H, \quad (4)$$

где σ и ξ – механическое

напряжение и вызванное им сме-

ещение стержня в сечении x в момент времени t , ρ – плотность материала стержня, $u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$, $u_R = iR$, $u_L = L \frac{di}{dt} + \frac{S\Lambda}{E} \frac{d\sigma}{dt}$ – падения напряжения на конденсаторе, активном сопротивлении и индуктивности обмотки, i – ток в электрической цепи, e – выходной сигнал генератора, B и H – индукция и напряженность магнитного поля, $\varepsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ – деформация в стержне, E – модуль упругости МСС при постоянной напряженности магнитного поля, μ – магнитная проницаемость при постоянной деформации, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, Λ – магнитострикционная константа.

Уравнение (1) описывает механические колебания МСС, уравнение (2) – колебания контура, который образуют согласующий конденсатор с обмоткой. Эти колебательные системы связаны пьезомагнитными уравнениями (3, 4).

Учёт вязких потерь в стержне по модели Максвелла [4] в комбинации с (3) приводит к выражению:

$$\varepsilon = E^{-1} \sigma + \eta_B^{-1} \int_0^t \sigma dt + \Lambda E^{-1} H. \quad (5)$$

где η_B – коэффициент вязкости.

Подставив (5) в (1) и считая форму колебаний механического напряжения σ в МСС такой же, как и свободно-свободного однородного стержня без учёта магнитострикционного преобразования – $\sin kx$, получаем:

$$\frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \omega Q_0^{-1} \frac{d\sigma}{dt} + \omega_0^2 \sigma - \frac{\pi \Lambda}{2} \frac{d^2 H}{dt^2} = 0, \quad (6)$$

где ω_0 – первая собственная частота, $Q_0 = \frac{E}{\omega \eta_B}$ – добротность стержня, ω – частота колебаний.

Из (2) с учётом (4) получаем уравнение для тока в цепи возбуждения i :

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \omega Q_g^{-1} \frac{di}{dt} + \omega_g^2 i + \frac{S\Lambda}{E} \frac{d^2 \sigma}{dt^2} = \frac{1}{L} \frac{de}{dt}, \quad (7)$$

где $Q_g = \frac{\omega L}{R}$ – добротность последовательной цепи, $\omega_g = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота генератора, S – площадь поперечного сечения стержня, n – плотность намотки преобразователя. Положим $i = I_m \exp(j\omega t)$; $\sigma = \sigma_m \exp(j\omega t)$; $e = E_m \exp(j\omega t)$ σ_m и E_m – амплитуды тока, механического напряжения и первой гармоники ЭДС соответственно. Тогда система уравнений (6) и (7) принимает вид:

$$\begin{pmatrix} -\eta_g + jQ_g^{-1} & -\frac{S\Lambda}{E_0 L} \\ -\frac{1}{2}\pi\Lambda n & -\eta_0 + jQ_0^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_m \\ \sigma_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{j}{\omega L} E_m \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\eta_0 = 1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$, $\eta_g = 1 - \left(\frac{\omega_g}{\omega}\right)^2$. Решение системы (8) при $K_{CB}^2 = \frac{\pi\Lambda^2 S n}{2E_0 L}$:

$$I_m = \frac{j E_m (-\eta_0 + jQ_0^{-1})}{\omega L [\eta_0 \eta_g - Q_0^{-1} Q_g^{-1} - K_{CB}^2 - j(\eta_g Q_0^{-1} + \eta_0 Q_g^{-1})]}, \quad (9)$$

$$\sigma_m = \frac{j \pi \Lambda n E_m}{2 \omega L [\eta_0 \eta_g - Q_0^{-1} Q_g^{-1} - K_{CB}^2 - j(\eta_g Q_0^{-1} + \eta_0 Q_g^{-1})]},$$

Обратимся к наиболее прозрачному случаю равных собственных частот – $\omega_g = \omega_0$, $\eta_g = \eta_0 = \eta$. Квадрат модуля знаменателей (9) равен $(Q^{-1} = \frac{Q_0^{-1} + Q_g^{-1}}{2})$:

$$\eta^4 - 2\eta^2 (K_{CB}^2 - Q^{-2}) + (K_{CB}^2 + Q^{-2})^2. \quad (10)$$

При $K_{CB}^2 - Q^{-2} < 0$ это выражение имеет один экстремум – максимум – при $\eta = 0$. Амплитудные значения тока и механического напряжения тогда равны

$$I_m \approx \frac{E_m Q^{-1}}{Q^{-2} + K_{CB}^2}; \quad \sigma_m \approx \frac{\pi \Lambda n E_m}{2 \omega L (K_{CB}^2 + Q^{-2})}. \quad (11)$$

При $K_{CB}^2 - Q^{-2} > 0$ выражение (10) имеет экстремумы при $\eta_1 = 0$, $\eta_{2,3} = \pm \sqrt{K_{CB}^2 - Q^{-2}}$, что соответствует частотам

$$\omega_1 = \omega_0; \quad \omega_{2,3} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm \sqrt{K_{CB}^2 - Q^{-2}}}}. \quad (12)$$

В этом случае $\omega = \omega_0$ ($\eta = 0$) есть точка минимума, амплитуда механического напряжения при этом определяется вторым выражением (11).

При $\omega = \omega_{2,3}$ амплитуда механического напряжения имеет два максимума

$$\sigma_{m2,3} \approx \frac{\pi \Lambda n E_m}{4 \omega L K_{CB}} Q.$$

Таким образом, на амплитудно-частотной характеристике системы имеем в соответствии с (12) две резонансные частоты, одна из которых выше, а другая – ниже частоты ω_0 . Это является важнейшим свойством связанных контуров. Резонансные частоты ω_2 и ω_3 называют частотами связи. При уменьшении K_{CB} частоты связи сближаются и при $K_{CB} = Q^{-1}$ сливаются с ω_0 : $\omega_2 = \omega_3 = \omega_0$.

При различных добротностях генератора и МСС амплитуды колебаний на частотах связи будут различными. Частоту связи с большей амплитудой мы называем основной резонансной частотой, а частоту с меньшей амплитудой – побочной резонансной частотой.

1. Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – Л.: Энергоиздат. – 1982. – 208 с.
2. Дейвис Р.М. Волны напряжений в твердых телах / Р.М. Дейвис. – М.: Изд-во иностр. лит. – 1961. – 104 с.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСА РАБОЧИХ ТОРЦОВ ВОЛНОВОДОВ ВО ВРЕМЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Спиридонов Н.Г., Мурашкин С.В., Селиванов А.С.,
Нурмеев Д.Р., Соколов В.В.

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия
spiridonov.nikol@yandex.ru, SV.Murashkin@yandex.ru, selivas@inbox.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования износа рабочих торцов волноводов с различными типами покрытий при ультразвуковой сварке изделий из армированного стекловолокном полипропилена.

Введение

В современной промышленности все активнее начинают применять новые композитные полимеры и новые методы их сборки. Ультразвуковая сварка является одним из наилучших способов соединения изделий из полимеров. Так как при ней нет расходов на закупку дополнительных материалов (клея и метизы), процесс не требует подготовки поверхности (зачистка кромок и обезжиривание), процесс может быть автоматизирован, что сокращает затраты и повышает стабильность качества [1].

В современных научных исследованиях практически все авторы делают акцент на влиянии параметров режима ультразвуковой сварки на прочностные характеристики соединения. Однако армирование полимеров повышает их прочностные характеристики, что приводит к износу торцов волноводов. Вследствие чего нарушается геометрия сварной точки и ухудшается стабильность получения качественного соединения. Данный аспект в литературе не освещен. Поэтому целью работы является определение влияния различных типов покрытий на износостойкость рабочих торцов волноводов в процессе ультразвуковой сварки [2].

Методика исследования

Исследования проводили на базе производства пластиковых изделий АО «АвтоВАЗ» при автоматической ультразвуковой многоточечной сварки элементов дверной карты автомобиля LADA Vesta.

В качестве оборудования использовали генератор УЗГ-1/30 с диапазоном мощности от 0.6 до 1.5 кВт и диапазоном частоты колебаний от 16 до 35 кГц. Ультразвуковую колебательную систему, оснащенную магнитострикционным преобразователем с частотой 30 кГц.

Для проведения исследований было изготовлено пять волноводов из титанового сплава ВТЗ-1, на которые были нанесены различные типы покрытий: алюминий, сплав АМг4, вольфрам, кобальт, сплав ВК6, никель.

Покрытие на волноводы наносили электроискровым методом вручную с помощью лабораторной установки ENPO UR-121. Толщина покрытия в среднем составила порядка пяти микрон.

В качестве образцов для проведения исследования в условиях производства выбрали подоконную накладку дверной карты автомобиля LADA Vesta, выполненную из Softell TKG 300N C13034.

Каждую 1000 циклов производили демонтаж волновода с покрытием, для изучения степени износа.

Степень износа волноводов оценивали путем измерения площади образующихся впадин на торце волновода.

Процесс ультразвуковой сварки происходил в автоматическом режиме на следующих режимах:

- мощность на выходе – 900...1000 Вт;
- время сварки – 3 с;
- сварочное усилие – 4 кгс/см².

Ультразвуковую сварку осуществляли на многоточечных линиях компании CES.

Результаты

На рисунке 1 показаны фотографии результатов исследований.



Рис. 1. Изношенные торцы волноводов с различными покрытиями

Наихудшую износостойкость показали покрытия на основе алюминия, АМг4 и никеля, так как первые очаги износа на рабочих торцах волноводов в процессе ультразвуковой сварки на них появились в пределах тысячи сваренных деталей.

Покрытия на основе никеля и твердого сплава показали хорошие результаты по износостойкости, однако при длительной работе было замечено налипание полимерного материала к торцу волновода, что приводило к вырыванию сварной точки при отводе ультразвуковой колебательной системы, а, следовательно, и потери прочности получаемого соединения.

Покрытие на основе кобальта показало наилучшие результаты из всех, так как за время проведения испытаний на торце волновода не образовалось очагов износа, а также не было замечено налипание полимерного материала

Заключение

В процессе ультразвуковой сварки армированных стекловолокном полимеров происходит износ ультразвуковых волноводов, который снижает стабильность качества соединения.

Покрытие на основе кобальта позволяет существенно повысить износостойкость титановых волноводов в процессе ультразвуковой сварки.

1. Kuznetsov A. V., Sokolov A. V. Investigation of the influence of welding parameters on the quality of ultrasonic welding of polypropylene // Advanced Materials Science and Engineering. 2020. № 10. P. 1–8.
2. Wang K., Li Y., Banu M., Li J., Guo W., Khan H. Effect of interfacial preheating on welded joints during ultrasonic composite welding // J Mater Process Technol. 2017. № 246. P. 116–22.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ И ИСПЫТАНИЙ КАВИТОМЕТРОВ

Минчук В.С., Гаврилюк В.А., Котухов А.В., Колтович В.А.,
Федоринчик М.П., Дежкунов Н.В.

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

В данной работе представлена установка, предназначенная для испытаний датчиков кавитации и кавитометров. Может использоваться также для исследования кавитации и кавитационных эффектов в ультразвуковых ваннах и звукохимических реакторах.

В состав установки входят: спектрально – акустический индикатор кавитации, комплект датчиков кавитации, блок термостатирования, система позиционирования датчиков кавитации и генераторный блок. Работа установки обеспечивается комплектом интегрированного программного обеспечения (ПО).

Общий вид упрощенной версии установки показан на рисунке 1 (состав и параметры установки могут изменяться по требованию заказчика).

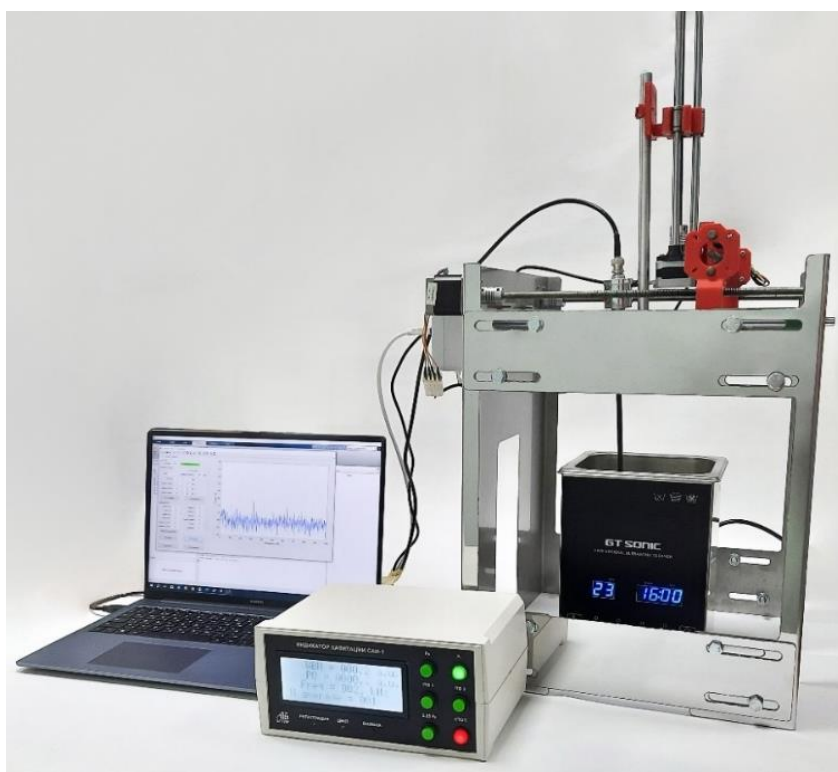


Рис. 1. Общий вид установки

Центральным звеном установки является спектрально – акустический индикатор кавитации (САИ-1). В индикаторе реализовано 2 способа вычисления уровня кавитации: «аналоговый» и «цифровой». В первом варианте сигнал с датчика кавитации через высокочастотный BNC-разъём подаётся на согласующий усилитель. Затем, усиленный сигнал проходит через 2 фильтра: узкополосный и широкополосный. Схема вычисления уровня кавитации представляет собой RMS-преобразователь переменного напряжения в постоянное. Полученное напряжение подаётся на микроконтроллер. Во втором варианте сигнал с датчика подаётся на предварительный уси-

литель с антиалиасинговым фильтром. Затем происходит оцифровка сигнала в блоке аналого-цифрового преобразователя и последующее вычисление необходимых параметров в микроконтроллере. Микроконтроллер управляет временем и количеством измерений, передаёт результаты в программу на персональном компьютере по интерфейсу USB, отображает информацию на графический жидкокристаллический индикатор. В данном режиме индикатор позволяет синхронно регистрировать несколько оценок активности кавитации и компонент спектра кавитационного шума: амплитуду гармонических составляющих (субгармоника $f_0/2$, основная гармоника f_0 , 2-я и 3-я гармоники), величину непрерывной составляющей спектра на частоте $2,25f_0$ и три диапазона интегрирования спектра (оператор может задавать границы интегрирования).

Данное оборудование обеспечивает возможность сканирования ультразвукового поля в трех плоскостях как в непрерывном, так и в пошаговом режимах. Программой задаётся скорость передвижения датчика, размеры исследуемой области, ее координаты в пространстве и размер шага. Одновременно в реальном масштабе времени регистрируется выходной сигнал датчика кавитации, выполняется спектральный анализ кавитационного шума и визуализируется динамика изменения во времени характерных составляющих спектра кавитационного шума.

На рисунке 2 представлен интерфейс программного обеспечения спектрально – акустического индикатора и пример спектра кавитационного шума.

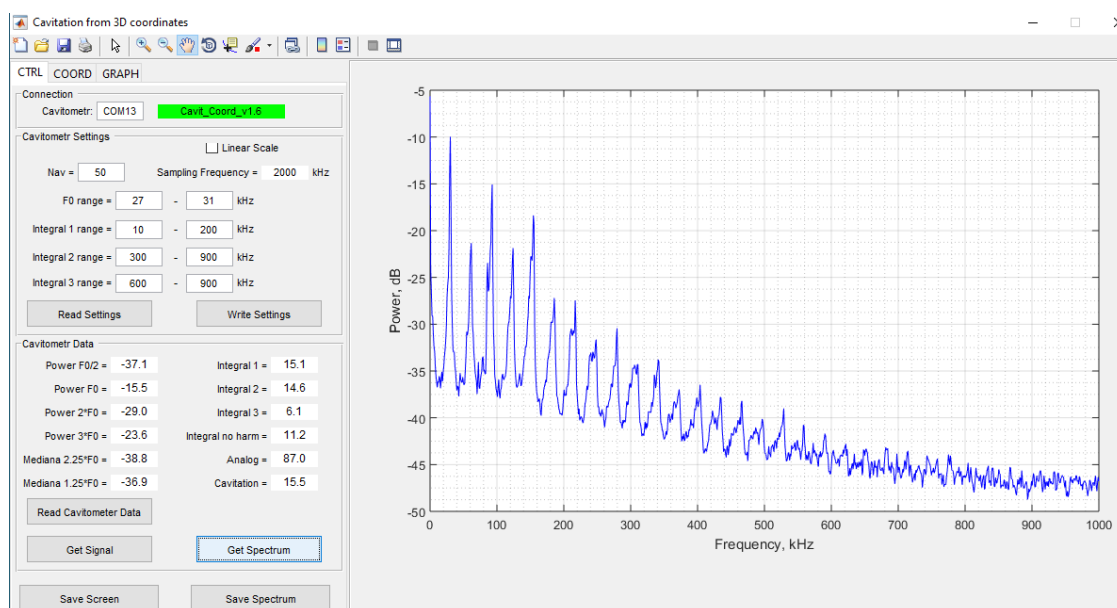


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения

ПО представляет собой скрипт matlab с графическим интерфейсом. Обладает функциями визуализации спектров кавитационного шума, графиков регистрации компонент спектра во времени и в зависимости от положения датчика кавитации, рассчитывает статистические характеристики, а также позволяет сохранять полученные результаты.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ

Курлюк Е.А., Минчук В.С., Олешук И.Е., Дежкунов Н.В.

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

Кавитация представляет собой процесс образования парогазовых полостей в жидкости, возникающий при локальном снижении давления [1]. В настоящее время наиболее распространёнными методами оценки эрозионной активности кавитации являются стандарты ASTM G32 [2] и метод струйной кавитации ASTM G134 [3]. Существенными недостатками данных методов, использующих объемные тест-образцы, является необходимость длительной экспозиции для получения регистрируемых изменений веса образцов и их влияние на звуковое поле.

Нами ранее предложена методика анализа динамики разрушения кавитационных тест-образцов, основанная на использовании образцов из алюминиевой фольги [4]. В соответствии с этой методикой образцы располагаются вертикально под погружным ультразвуковым излучателем на расстоянии δ от него. Под действием кавитации верхний край образца разрушается. Регистрация процесса образования и развития кавитационных повреждений на поверхности образцов осуществляется посредством видеосъёмки. С помощью разработанного программного обеспечения на языке Python, реализующего алгоритмы MeanShift и KMeans из библиотек OpenCV и scikit-learn, проводилось определение геометрических характеристик разрушения образцов, таких как максимальная глубина и площадь повреждения.

Программное обеспечение на основе алгоритма кластеризации k-means обеспечивает удовлетворительную точность определения контуров фольги в условиях низкого газосодержания жидкости и при соблюдении стабильного и равномерного освещения. Однако при увеличении содержания растворённых газов и возникновении на поверхности тест-образцов больших стабильных пузырьков, а также при появлении локальных неоднородностей освещения (рисунок 1а), точность сегментации существенно снижается. Это проявляется в ошибочной идентификации участков фольги как разрушенных и появлении артефактов на бинарной маске (рисунок 1б), что приводит к значительным искажениям при последующем расчёте динамики разрушения образцов.

В настоящей работе предложено усовершенствованное программное обеспечение (ПО), основанное на использовании предварительно обученной нейросетевой модели сегментации Segment Anything Model (SAM). Испытания показали, что данное ПО демонстрирует повышенную устойчивость к перечисленным выше неблагоприятным факторам. Применение данной модели позволило значительно снизить влияние оптических шумов и артефактов от пузырьков воздуха на результаты сегментации (рисунок 1в).

На рисунке 1г представлены результаты регистрации динамики максимальной глубины разрушения, показывающие эффективность использования SAM в сравнении с алгоритмом k-means. На графике k-means (сплошная линия) имеются выбросы примерно на 15-й и на 31-й секунде после начала эксперимента, обусловленные некорректной работой алгоритма сегментации изображений. Изображение на рис. 1б соответствует моментам таких выбросов.

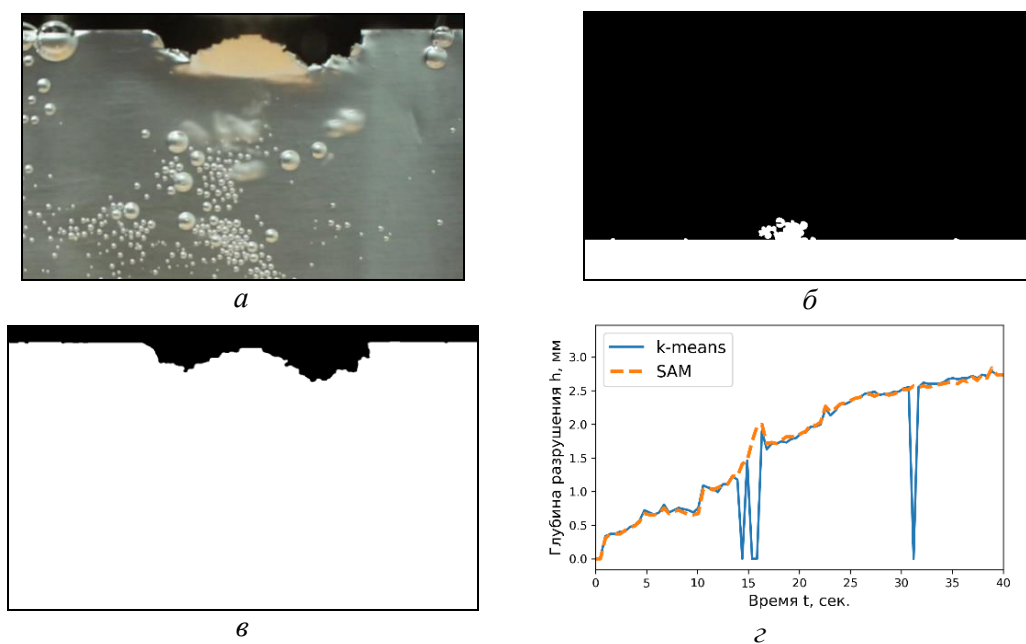


Рис. 1. Результаты регистрации кавитационной эрозии тест-образца в воде с повышенным газосодержанием: *а* – эродированный тест-образец; *б* – результат ошибочной сегментации изображения с использованием k-means; *в* – результат правильной сегментации изображения с использованием SAM; *г* – динамика изменения максимальной глубины разрушения образца.

На графике SAM (шпиховая линия) отсутствуют такие выбросы. Таким образом, ПО, разработанное программное обеспечение на основе модели SAM об значительное повышение точности и стабильности анализа динамики кавитационного разрушения тест-образцов. Данная методика анализа кавитационной эрозии будет применяться в дальнейших работах авторов, направленных на выявление корреляции интенсивности составляющих спектра кавитационного шума и эрозионной активности кавитации, оцениваемой по скорости разрушения тест - образцов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № T24МП-056.

1. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. – М.: Наука, 2008.
2. ASTM G32-10: Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/76153/3713bb4727904baab42b82e986d64f7c/ASTM-G32-10.pdf>. – Дата доступа: 11.03.2025.
3. ASTM G134-95: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Micro-Abrasion Technique with Pressure and Fluid Erosion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/16001/a3a6360ef52f42ddb2239cd79375ad1d/ASTM-G134-95.pdf>. – Дата доступа: 11.03.2025.
4. Курлюк, Е. А. Методика анализа динамики разрушения кавитационных тест-образцов / Е. А. Курлюк, И. Е. Олешук, В. С. Минчук, Н. В. Дежунов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 1–3 (100). – С. 175–179. – <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-1-3-175-179>.

ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ КАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВАННАХ

Минчук В.С., Курлюк Е.А., Олешук И.Е., Дежкунов Н.В.

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

Введение. Обеспечение высокой стабильности и воспроизводимости кавитационных процессов является актуальной задачей для многих потенциально перспективных применений мощного ультразвука ([1, 2], например). В данной работе исследовано влияние вариаций уровня жидкости h в ванне и ее температуры t на состояние кавитационной области и активность кавитации.

Методика исследований и оборудование. Для исследования кавитации использовались кавитометр ИСА-3М и пьезоэлектрический гидрофон (БГУИР, Минск). Выходной сигнал регистрировался программой, входящей в состав кавитометра. В результате получали распределение $A_c(L)$, где L – расстояние от торца гидрофона до излучателя, а A_c – соответствующее показание кавитометра. Усреднение по распределению давало усредненную вдоль оси величину активности кавитации W_h . Измерения повторяли по 15 раз для каждого уровня жидкости $h = 70, 71, 72, 73, 74$ мм. В качестве рабочих жидкостей использовались водопроводная вода, вода деионизированная ISO 3696-2013 и бутилированная вода с предварительной дегазацией в течение 2 мин.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены результаты сканирования ванны. Для каждой точки графика отображен интервал в пределах $\pm$ одного стандартного отклонения, графики для $h = 71, 72, 73$ мм не приведены. При максимальном уровне жидкости ($h = 74$ мм) наблюдается выраженное чередование максимумов и минимумов, что указывает на формирование компоненты стоячей акустической волны.

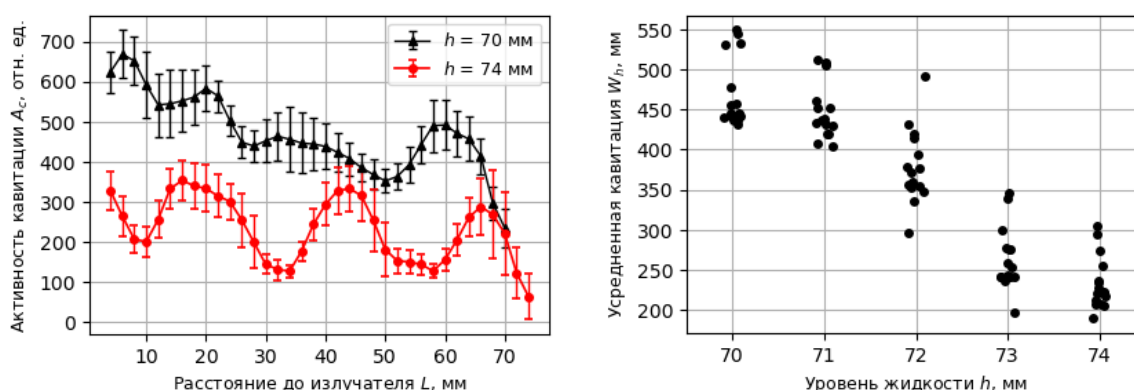


Рис. 1. Распределение активности кавитации вдоль оси излучателя (слева) и усредненная активность кавитации (справа) при различном уровне жидкости

Изменение уровня жидкости в ванне на 1-2 мм приводят к существенному изменению формы распределения активности кавитации.

В правой части рисунка 1 приведена диаграмма рассеяния среднего значения активности W_h вдоль оси излучателя в зависимости от уровня жидкости в ванне.

Диаграмма содержит 5 групп по 15 наблюдений в каждом. Увеличение уровня жидкости и соответственно - приближение к оптимальным условиям возникновения стоячей волны приводит к снижению среднего значения активности кавитации вдоль оси излучателя, что является неожиданным и труднообъяснимым результатом.

На рисунке 2 показаны результаты сканирования ультразвуковой ванны гидрофоном при различных температурах жидкости. Видно, что форма распределения кавитационной активности вдоль оси излучателя при изменении температуры остаётся в целом неизменной. Правая часть рисунка представляет собой диаграмму рассеяния среднего значения активности кавитации W_t вдоль оси излучателя.

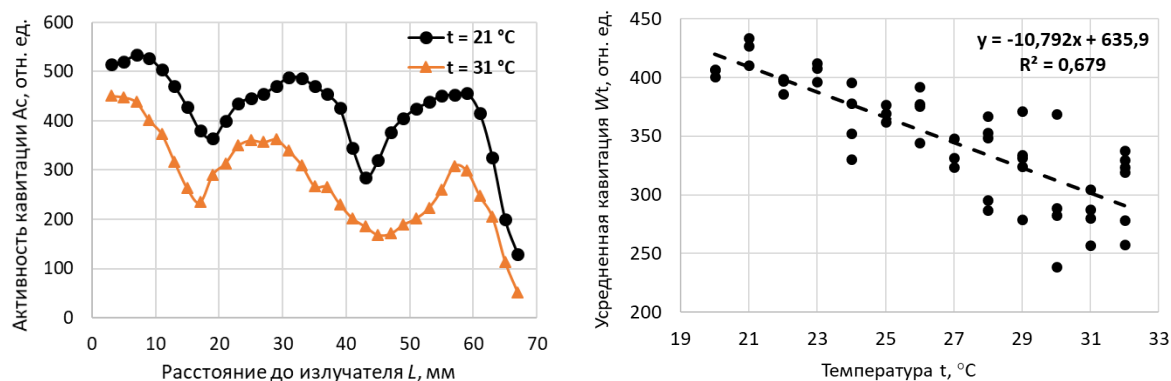


Рис. 2. Распределение активности кавитации вдоль оси излучателя (слева) и усредненная активность кавитации (справа) при различной температуре жидкости

Результаты внутри каждой группы имеют высокую дисперсию, поэтому для проведения строгого статистического сравнения потребовалось бы большое число опытов. Тем не менее можно утверждать, что колебания температуры жидкости даже в небольшом диапазоне не позволяет получить высокую степень воспроизводимости кавитационных режимов.

Представленная в данной работе методика исследований и результаты будут использоваться при разработке предложения по стандартизации измерений и введению единицы активности кавитации.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № T24МП-056.

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: Издательство Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. 2010. – 250 С.
2. Saliev, T. and Akishev M. Ultrasound binary microbubble drug delivery and drug synthesis for cancer treatment /T. Saliev, and M. Akishev // Journal of Analytical Science and Technology. – 2025. – V. 16:11. <https://doi.org/10.1186/s40543-025-00475-3>

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Макаров С.В., Плотников В.А., Гаврикова Д.А.

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

makarov@phys.asu.ru

Акустопластический эффект, заключающийся в повышении пластичности материалов и скачкообразном снижении механического напряжения деформирования под действием ультразвука, был экспериментально обнаружен Блах и Ланженеке-ром [1]. Эффект, наблюдаемый в широком диапазоне частот от единиц герц до мегагерц, наиболее широкое применение в настоящее время нашел в диапазоне 15–40 кГц. Фактически акустопластический эффект реализуется при одновременном воздействии ультразвука и статического нагружения, то есть является результатом суммирования (суперпозиции) статических напряжений и динамических напряжений ультразвуковой волны [2,3]

Проанализированные эффекты повышения плотности дислокаций и вакансий в ультразвуковом поле стоячих волн, очевидно, обусловлены высокими динамическими напряжениями. Действительно, как показано в ряде публикаций [3,4,5,6] величина динамического напряжения ультразвуковой волны могло достигать 10^8 Па, а в экспериментах по ползучести [4,6] металл находился в поле динамических и статических механических напряжений, сопоставимых друг с другом. В технологических процессах, например, при прокатке амплитуда динамических напряжений лежит в диапазоне 10^7 - 10^8 Па.

Из проведенного анализа акустопластического эффекта можно сформулировать ряд вопросов, касающихся физики явления. В частности остался неясным основной механизм повышения пластичности в ультразвуковом поле, следствием чего является релаксация напряжения (скачкообразное снижение напряжения). Противоречивые данные (либо это резонансное взаимодействие отдельной дислокации, либо это суммарное действие динамического и статического напряжений) не позволяют однозначно трактовать повышение пластичности при действии ультразвука.

Проведен анализ экспериментальных данных по накоплению деформации в алюминии при нагреве его до предплавильных температур в условиях действия статических напряжений и низкоамплитудных ультразвуковых колебаний.

При высокотемпературной деформации алюминия или его сплавов в условиях механического нагружения и внешнего ультразвукового воздействия возможен эффект резонансного взаимодействия сигналов акустической эмиссии и внешнего ультразвука, если частота внешнего ультразвука совпадает с частотой основных резонансов деформируемого объема образца, представляющего собой естественный резонатор. Как было показано ранее [7] акустическое поле стоячих продольных и поперечных волн, сформированное как результат преобразования первичных сигналов акустической эмиссии на естественных резонаторах деформируемого объема, обеспечивают активацию и корреляцию элементарных деформационных сдвигов в макроскопическом масштабе. Этот масштаб (масштаб корреляции) определяется длиной стоячей акустической волны, равной в нашем случае геометрическим размерам области локализации деформации. Резонансное сложение, точнее резонансная суперпозиция спектральных составляющих акустической эмиссии и внешнего ультразвука, сопровождается существенным повышением амплитуд основных спектральных составляющих, что приводит к накоплению в деформируемом объеме значительной по величине колебательной энергии стоячих акустических волн. Эта колебательная энергия в совокупности со статическим напряжением и тепловыми флуктуациями и

определяют аномально высокую пластичность деформируемого металла. Высокая пластичность обеспечивается переходом от накопления деформации, контролируемой переползанием дислокаций, к накоплению деформации, контролируемой зернограницным проскальзыванием [8]. Эффект достигается лишь при критических значениях температуры, механического напряжения и колебательной энергии акустического поля стоячих волн.

1. Blaha, B. Langenecke // Naturwiss. Rundsch. – 1955. – 42. – Н.20. – S. 556.
2. Малыгин Г.А. Акустопластический эффект и механизм суперпозиции напряжений // ФТТ. 2000. Т.42. №1. С. 69-75.
3. Тяпунина Н.А., Благовещенский В.В., Зиненкова Г.М., Ивашкин Ю.А. Особенности пластической деформации под действием ультразвука // Известия вузов. Физика. 1982. №6. С. 118-128.
4. Жернов С.А., Омеляненко И.Ф., Сиренко А.Ф. Высокотемпературная ползучесть и разрушение меди в поле ультразвука // ФММ. 1984. Т. 58. №3. С. 589-595.
5. Бадалян В.Г., Воронцова Н.Н., Казанцев В.Ф., Назаров А.В. Изменение дислокационной структуры меди в результате воздействия статических и ультразвуковых напряжений // ФММ. 1982. Т.54. №6. С. 1191-1193.
6. Ушаков В.И., Омеляненко И.Ф., Сиренко А.Ф. Ползучесть алюминия и его сплавов в поле ультразвука // ФММ. 1985. Т. 59. №5. С. 584-592.
7. Макаров С.В., Плотников В.А. Потекаев А.И. Акустическая волновая корреляция элементарных деформационных актов в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки ГЦК металлов // Изв. Вузов. Физика. 2014. №. 12. С. 14-18.
8. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В. Накопление деформации и акустическая эмиссия в алюминиево-магнелиевых сплавах в условиях деформационного структурного перехода // Вестник Тамбовского университета, 2016, т. 21, №3, с. 1131-1135.

ОБ ЭНЕРГИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Улитёнок А.О.

Могилёв, Республика Беларусь
alexulinok@yandex.ru

В последние годы появился так называемый метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) [1]. В работе [2] предложена иная, чем в [1] физико-математическая модель АДУ.

Расчёт по указанной модели показал, что значения внешней энергии от воздействия звука на компоненты твердого сплава $(6,65 \dots 9,07) \cdot 10^{-23}$ Дж [3] $\ll (2,5 \dots 11,1) \cdot 10^{-18}$ Дж – энергии «...достаточной для смещения атомов кристаллической решетки твердых сплавов. ...» (заключение 2 по работе [1]). То есть, в работе [2] вывели формулу, доказывающую ложность заключения 2 в [1] о том, что «...при давлении подающего воздуха, равного 0,2 МПа, на частотах 148 и 159 Гц, ... обеспечивается энергия, воздействующая на атомы элементов твердого сплава, равная $(2,5 \dots 11,1) \cdot 10^{-18}$ Дж, ...».

Иными словами, заключение 2 работы [1] опровергается работой [2] в части подводимой энергии для смещения атомов кристаллической решетки (далее – САКР) твёрдых сплавов (ТС). А это говорит о том, что от звукового воздействия при АДУ отсутствуют [3]:

- явление САКР ТС из-за крайне низкой подводимой энергии, которая на 5 порядков ниже энергии этого смещения,
- уменьшение плотности дислокаций и искажений кристаллических решеток компонентов ТС из-за отсутствия САКР,
- упрочняющее или разупрочняющее воздействие звука на материалы при их обработке методом АДУ. Отсутствие всего этого подтверждает выводы работ, указанных в [3], во-первых,
- о наличии в [1] противоречий со школьным курсом математики, теорией твердого тела, основами металлургии, материаловедением и философией и, во-вторых, об отсутствии в [1]:
- теоретических основ АДУ,
- экспериментальных доказательств заявленного резонанса атомов компонентов твердых сплавов,
- достоверных результатов рентгеноструктурного анализа,
- адекватности физических явлений при АДУ.

Всё это подтверждается также данными о соотношении энергий звуковой волны при обработке методом АДУ и ультразвуковой обработкой. Так, с одной стороны, в работе [4] указано, что энергия ультразвуковой волны мала по сравнению с энергией межатомных связей, и, следовательно, ультразвук не может вызвать смещения атомов из узлов кристаллической решетки. А, с другой стороны, согласно формуле (1.40) работы [5] энергия звуковой волны, распространяющейся в твёрдом теле, кроме всего прочего, прямо пропорциональна квадрату частоты. Принимая во внимание то, что частота АДУ не более 200 Гц, а частота ультразвука более 20000 Гц, энергия звуковой волны при обработке АДУ по отношению к обработке ультразвуком отличается более чем в $(20000/200)^2 = 100^2 = 10000$ раз. Поэтому от АДУ смещение атомов из узлов кристаллической решетки невозможно.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что метод АДУ не имеет ни научной, ни практической значимости.

1. Жигалов А.Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2021. 378 с.
2. Жариков А. Н., Жигалов А. Н. Расчет интенсивности звуковой энергии для обработки твердого сплава методом аэродинамического звукового упрочнения // Технологическое обеспечение машиностроительного производства: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – 211 с.: ил.
3. Улитёнок, А.О. Расчёт энергии аэродинамического звукового воздействия на атомы кристаллической решетки / А.О. Улитёнок // Литье и металлургия. 2024. № 2. С. 170-
4. Лосев, А. Ю. Исследование акустопластического эффекта и факторов, его вызывающих, методом Э В М моделирования / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. - М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2005.-16 С.
5. Клубович, В.В. Ультразвук в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: монография / В.В. Клубович, М.М. Кулак, Б.Б. Хина. - Мн.: БНТУ, 2006.-279 С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТИТАНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

Неласов И.В.^{1,2}, Манохин С.С.^{1,2}, Максименко В.Н.^{1,2},
Киселев Е.В.³, Колобов Ю.Р.^{1,2}

¹ ФИЦ ПХФ и МХРАН, Черногловка, Россия

² Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

³ МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

nelasov@icp.ac.ru

Актуальность исследования фазовых переходов в титане при высоких давлениях, возникающих как при ультразвуковом воздействии в процессе кавитации, так и при импульсной лазерной обработке, обусловлена существенной ролью выделяющихся в данных условиях карбидов титана (TiC), в упрочнении и повышении твёрдости приповерхностного слоя. Поскольку данный карбид обладает высокой твердостью, устойчивостью к износу и коррозии, он широко применяется в производстве режущих инструментов, а также как компонента композиционных материалов для повышения их износостойкости.

Ранее авторами установлено, что в процессе лазерной обработки импульсами наносекундной длительности в приповерхностном слое технически чистого титана формируются мелкодисперсные частицы TiC [в печати, Письма в ЖТФ, 2025]. Примечательно, что частицы карбидов отсутствуют за пределами обработанной зоны, что указывает на ключевую роль лазерной модификации в их формировании. Выдвинута гипотеза о влиянии высоких давлений, возникающих при лазерной обработке, на процесс образования TiC.

Для проверки данной гипотезы и определения термодинамической роли давления в образовании включений фазы TiC в титане проведено компьютерное моделирование с применением метода теории функционала плотности (DFT) с использованием пакета ABINIT. Рассчитаны энергии образования карбида титана в двух конфигурациях (с ОЦК и ГЦК структурой) и энергии растворения углерода в титане при высоких давлениях.

Результаты моделирования показали, что увеличение давления выше 20 ГПа приводит к распаду наноразмерных карбидов и как следствие к увеличению диффузионной подвижности углерода. Дальнейший рост давления выше 180 ГПа стимулирует повторное образование карбидной фазы как более энергетически предпочтительной по сравнению с твёрдым раствором. Данный механизм подтверждает предположение о ключевой роли высокого давления в процессе выделения частиц TiC в технически чистом титане при импульсной лазерной обработке.

Полученные результаты открывают перспективы для практического применения метода лазерной модификации поверхности титана с целью формирования карбидных включений. В частности, карбидообразование в поверхностном слое титана может способствовать улучшению механических свойств и продлению срока службы ультразвуковых волноводов, что имеет важное значение для различных областей применения в технике.

В части исследования формирующейся после ударно-волновой обработки структуры приповерхностных слоёв титана работы выполнены в рамках деятельности Передовой инженерной школы «Гибридные и комбинированные технологии» Тольяттинского государственного университета (шифр субсидии 4L 65561 613, МОН РФ). В части компьютерного моделирования работа выполнена по теме Государственного задания FFSG-2024-0018, № государственной регистрации 124020700089-3. Структурные исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН (г. Москва).

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗОНЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕДНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

Манохин С.С.¹, Колобов Ю.Р.¹, Неласов И.В.¹, Максименко В.Н.¹,
Колобова Е.Г.¹, Селиванов А.С.²

¹ ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия

² Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

manohin@icp.ac.ru

Актуальность исследования микроструктуры и фазового состава зоны сварных соединений медных пластинчатых образцов, полученных ультразвуковой сваркой, обусловлена необходимостью создания надежных и качественных соединений в различных областях промышленности, включая электронику, машиностроение и энергетику. Медь, благодаря своей высокой электропроводности и теплопроводности, широко используется в различных приложениях, что делает изучение ее сварных соединений крайне важным. Для исследования микроструктуры зоны сварных соединений были использованы современные структурные методы исследований. Для детального анализа микроструктуры и фазового состава на микроуровне применялись методы просвечивающей электронной микроскопии, которая позволила установить присутствие оксидных включений на границе раздела слоев меди, а также исследовать дефектную структуру в зоне сварного шва. Кроме того, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия в режиме просвечивающей растровой электронной микроскопии позволила определить распределение химических элементов, в частности кислорода и меди, в зоне сварки и выявить области, обогащенные оксидами. Зеренная структура зоны сварного соединения практически не отличается от исходной микроструктуры меди, характеризующейся однородной зеренной структурой со средним размером зерен 6.3 ± 0.27 мкм. Выявлено, что выбранные параметры ультразвуковой сварки оказывают существенное влияние на микроструктуру и фазовый состав зоны соединения, что сказывается на формировании связи между пластинами. Исследования выявили неоднородный характер формирования связи между медными пластинами при ультразвуковой сварке, (в одних областях формируются поры, в других - точечные "перемычки"). На границе раздела пластин после сварки обнаружены оксидные включения CuO толщиной около 20 нм, а также зафиксирована повышенная плотность дислокаций в области шва. Формирование микроструктуры и фазового состава зоны сварного соединения определяется процессами деформации, рекристаллизации, локального разогрева, образования оксидных фаз и пластической деформации материала.

В части исследования формирующегося после ультразвуковой сварки рельефа поверхности сварного соединения меди работы выполнены в рамках деятельности Пе-редовой инженерной школы «Гибридные и комбинированные технологии» Тольяттинского государственного университета (шифр субсидии 4L 65561 613, МОН РФ). Другие разделы работы выполнены по теме Государственного задания FFSG-2024-0018, № государственной регистрации 124020700089-3. Структурные исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН (г. Москва).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНОВЫХ ВОЛНОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИКА

Колобов Ю.Р.¹, Манохин С.С.¹, Неласов И.В.¹, Максименко В.Н.¹,
Колобова Е.Г.¹, Селиванов А.С.²

¹ *ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия*

² *Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия*

kolobov@icp.ac.ru

Титановые сплавы, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность, коррозионная стойкость и биосовместимость, играют ключевую роль в конструкциях, где требуется сочетание легкости и надежности. Титановые волноводы, используемые в качестве инструмента ультразвуковой сварки, подвергаются значительным нагрузкам и изменениям, которые могут приводить к преждевременному разрушению. Ультразвуковая сварка является перспективным методом соединения разнородных материалов, в том числе изделий из пластика, так как она позволяет создавать прочные и герметичные соединения без использования дополнительных материалов, таких как клеи или припой. Однако, как инструмент, титановые волноводы подвергаются непосредственному воздействию ультразвуковых колебаний, механических нагрузок и теплового воздействия. Это может вызывать значительные изменения в их микроструктуре и элементном составе, что в свою очередь влияет на их долговечность и эффективность как сварочных инструментов.

Для изучения изменений, происходящих в титановых волноводах после ультразвуковой сварки, в данной работе были использованы современные методы исследований рельефа поверхности и микроструктуры тонких приповерхностных слоев. Микроструктурный анализ проводился с применением оптической и растровой электронной микроскопии. Для детального анализа микроструктуры, включая фазовый состав и дефектную структуру, применялась просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Для анализа элементного состава применялась энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДС). Установлено, что эксплуатация используемых для сварки пластика титановых волноводов в процессе ультразвуковой сварки приводит к значительным изменениям их структуры и химического состава приповерхностных и более глубоких слоев. В приповерхностном слое у основания рабочего контакта с термопластиком обнаружены две выраженные структурные области: многочисленные дефекты в виде пор преимущественно глобулярной формы размером порядка 50-1500 мкм, а также бороздки в виде параллельных линий, ориентированные радиально от центра к периферии, как известно являющиеся следствием кавитационной коррозии. Последняя значительно ускоряет деградацию структуры поверхности. Обнаружено значительное повышение концентрации углерода и кислорода в областях волновода, которые подвергаются воздействию ультразвука и механическим нагрузкам при контакте с пластиком. Это свидетельствует о сложных химических реакциях и диффузионных процессах, происходящих в зонах сварки. Распределение элементов в контактной области носит неоднородный характер, что, вероятно, обусловлено неравномерностью теплового и механического воздействия во время сварочного процесса. В приповерхностном слое волновода наблюдаются дефекты в виде пор, в то время как структура предварительно нанесенного защитного никелевого покрытия почти не деградирует. Микроструктура сплава также претерпевает существенные изменения. Это проявляется в измельчении зерен и образовании кристаллитов размером около 50 нм в тонком подповерхностном слое и формировании повышенной плотности дефектов кристаллического строения. На поверхно-

сти волноводов, контактировавших с содержащим мелкодисперсные частицы оксида кремния композиционным термопластиком обнаружен аморфный слой толщиной около 4 мкм, обогащенный углеродом, кислородом и кремнием. Кроме того, установлено образование обогащенных оксидом кремния участков в местах контакта титанового волновода с пластиком, содержащим частицы оксидов. Наблюдаемые изменения структуры поверхности и микроструктуры приповерхностных слоев титановых волноводов свидетельствует о том, что в процессе ультразвуковой сварки термопластика с применением титановых волноводов в месте рабочего контакта имеет место локальное повышение температуры при циклическом нагружении. Это способствует развитию кавитационных процессов, пластической деформации материала и его насыщению входящими в состав пластика химическими элементами. Все это приводит к формированию специфического рельефа поверхности, наноструктурированию тонких приповерхностных слоев и формированию специфической зеренно-субзеренной микроструктуры, в том числе с образованием характерных для большой пластической деформации мезодефектов в виде деформационных полос.

В части исследования формирующегося после эксплуатации рельефа поверхности титановых волноводов работы выполнены в рамках деятельности Передовой инженерной школы «Гибридные и комбинированные технологии» Тольяттинского государственного университета (шифр субсидии 4L 65561 613, МОН РФ). В части детального исследования микроструктуры тонких приповерхностных слоев, включая фазовый состав и дефектную структуру, в титановых волноводах после ультразвуковой сварки работы выполнены в рамках госзадания по темкарте ФИЦ ПХФ и МХ РАН FFSG-2024-0018, № государственной регистрации №124020700089-3. Структурные исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН (г. Москва).

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА Mg–Zn–Zr ПУТЕМ СОВМЕЩЕНИЯ РКУП С УЛЬТРАЗВУКОМ

**Аксенов Д.А.¹, Шишкунова М.А.^{1,2}, Асфандияров Р.Н.¹, Рааб А.Г.¹,
Сементеева Ю.Р.^{1,2}, Аубакирова В.Р.²**

¹ Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

aksyonovda@mail.ru

Тематика биорезорбируемых имплантатов в настоящее время остается очень актуальной. Одними из перспективных материалов являются магниевые сплавы, так как они биосовместимы, гипоаллергенны и имеют модуль упругости близкий к модулю упругости человеческой кости. Однако, для применения данных сплавов необходимо повысить их прочность (не менее 300 МПа) и коррозионную стойкость. Для повышения коррозионной стойкости рассматривались различные системы сплавов на основе магния, в том числе с редкоземельными элементами. Одним из перспективных стал сплав системы Cu–Zn–Ca. Однако повышение прочности до требуемых пределов для данного сплава является нетривиальной задачей. С другой стороны, существуют сплавы имеющие высокие значения прочности уже в исходном отожженном состоянии, однако они обладают неудовлетворительной коррозионной стойкостью. Одним из таких примеров является сплав MA14, системы Mg–Zn–Zr. Трансформация структуры, проводимая методами термомеханической обработки, не позволяет достичь требуемого уровня коррозионной стойкости.

В данной работе рассмотрен несколько иной подход к трансформации структуры сплава МА14. Образцы сплава МА14 были подвергнуты деформационной обработке методом РКУП, совмещенным с одновременным воздействием ультразвука. Известно, что воздействие ультразвука на объем металла или сплава активно действует на дислокационную структуру, что в свою очередь может существенно менять кинетику формирования зеренно-субзеренной структуры.

В результате выполнения работы было установлено, что проведение РКУП, совмещенного с ультразвуком амплитудой 5 мкм, ведет к формированию однородной мелкозернистой структуры сплава МА14 со средним размером зерна 5 ± 3 мкм. Рентгеноструктурный анализ свидетельствует об уменьшении ОКР на 27% до значения 86 нм, при этом плотность дислокаций увеличивается в 1,6 раза ($5,66 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$). Предел прочности образцов составляет 300-310 МПа, при этом необходимо отметить, что пластичность 16% сплава МА14 после РКУП с ультразвуком превышает пластичность подобного образца после РКУП без ультразвука на 4%.

Иммерсионные коррозионные испытания в растворе Рингера показали, что скорость коррозии образцов после РКУП с ультразвуком относительно исходного образца снижается в 2 раза достигая значения 4 мм/год. Применение ПЭО-покрытия для полученных образцов может позволить снизить скорость коррозии дополнительно в 3-4 раза, тем самым достигая требуемого окна значений коррозионной стойкости сплавов для биорезорбируемых имплантатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-79-10325.

ВЛИЯНИЕ ПОСТДЕФОРМАЦИОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПЭО-ПОКРЫТИЯ НА КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА МА14

Шишкунова М.А.^{1,2}, Аксенов Д.А.^{1,2}, Асфандияров Р.Н.^{1,2}, Парфенов Е.В.², Сементеева Ю.Р.^{1,2}

¹ *Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, Уфа, Россия*

² *Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

shishkunomashaa@gmail.com

В последние годы биорезорбируемые материалы привлекают все большее внимание в области биомедицинских исследований и разработок. В частности, магниевые сплавы, обладающие уникальным сочетанием высокой удельной прочности и биосовместимости, рассматриваются в качестве перспективных материалов для временных имплантатов, таких как костные фиксаторы и стенты [1]. Однако низкая коррозионная стойкость, обусловленная высокой электрохимической активностью и низкая исходная прочность являются серьезным препятствием для их широкого использования.

Для решения проблемы высокой скорости коррозии магниевых сплавов применяются различные технологические способы обработки, включая методы интенсивной пластической деформации и нанесение специальных покрытий. Например, в работе [2] было установлено, что измельчение зерна может вести к увеличению коррозионной стойкости. Такое поведение как правило, объясняют тем, что пассивирующий слой менее однороден в крупнозернистых областях, чем в мелкозернистых. Также заметное влияние на сопротивление коррозии оказывает напряженное состояние. Помимо традиционного подхода снижения внутренних напряжений термообра-

боткой существует метод объемной ультразвуковой обработки (УЗО), которая ведет к снижению внутренних напряжений, тем самым повышая термическую стабильность и пластичность материалов без изменения прочностных свойств [3]. Использование покрытий, полученных методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО), помогает дополнительно повысить коррозионную стойкость за счет формирования барьерного слоя, который препятствует проникновению агрессивных ионов (например, хлоридов) к поверхности магниевого сплава [4].

Целью данной работы является исследование изменений коррозионных характеристик биорезорбируемого сплава системы Mg-Zn-Zr, деформированного методом РКУП с постдеформационным ультразвуковым воздействием и ПЭО-покрытием.

В качестве исходного принято состояние сплава Mg-8,6Zn-1,2Zr после отжига при 420 °С в течении 48 часов. Деформация проводилась методом РКУП по следующему режиму: первый проход при 400 °С с углом пересечения каналов 120° и второй проход при 250 °С с углом пересечения каналов 90° при скорости деформирования 1 мм/с. Ультразвуковая обработка осуществлялась в течение времени $t = 120$ с, амплитуда колебания составляла 10 мкм, частота $f = 19,8$ кГц. ПЭО проводилось в импульсном униполярном (PUP) электрическом режиме.

В исходном состоянии наблюдается смешанная структура, состоящая из крупных вытянутых зёрен с поперечным размером 30 ± 10 мкм и мелких рекристаллизованных зёрен с средним размером $4,2 \pm 2,5$ мкм на границах крупных зёрен. После РКУП сохраняется смешанный вид структуры, и ультразвуковая обработка не ведет к существенным изменениям в структуре. Согласно результатам EBSD-анализа, деформация приводит к значительному измельчению структуры, уменьшая размеры рекристаллизованных зёрен в два раза. Доля большеугловых границ увеличивается с 63 % до 74 % после РКУП, но после ультразвуковой обработки наблюдается рост доли малоугловых границ, преимущественно в крупных полосовых зёрнах.

РКУП сплава Mg-8,6Zn-1,2Zr приводит к увеличению предела прочности на 10 % до 330 ± 5 МПа. Ультразвуковая обработка снижает предел текучести до 210 ± 8 МПа и существенно повышает пластичность до 19 %. Однако также отмечается снижение предела прочности.

Анализ гравиметрических коррозионных испытаний в растворе Рингера свидетельствует о том, что после РКУП скорость коррозии увеличивается по сравнению с исходным состоянием в 1,5 раза до $12,00 \pm 0,80$ мм/год. Ультразвуковая обработка способствует снижению скорости коррозии. Ее минимальное значение $8,20 \pm 0,40$ мм/год, соответствующее исходному отожжённому состоянию, достигается на 25 день испытания. ПЭО-покрытие позволяет повысить коррозионную стойкость почти в 3 раза ($2,83 \pm 0,06$ мм/год) по сравнению с исходным состоянием.

Таким образом, УЗО и ПЭО-покрытие являются эффективными методами, способствующими улучшению коррозионных свойств магниевого сплава.

Работы выполнены при поддержке проекта РНФ № 22-79-10325.

1. Ibrahim H. et al. In Vivo Assessment of High-Strength and Corrosion-Controlled Magnesium-Based Bone Implants //Bioengineering. – 2023. – Т. 10. – №. 7. – С. 877.
2. Jianwei L. I. et al. Effect of grain refinement induced by wire and arc additive manufacture (WAAM) on the corrosion behaviors of AZ31 magnesium alloy in NaCl solution //Journal of Magnesium and Alloys. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 217-229.
3. Nazarov A. A. et al. Bulk ultrasonic treatment of crystalline materials //Metals. – 2023. – Т. 13. – №. 2. – С. 344.
4. Mukaeva V. R. et al. Diagnostics of the thickness of a plasma electrolytic oxidation coating on a nanostructured Mg-Sr alloy //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 292. – №. 1. – С. 012067.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В WAAM ТЕХНОЛОГИИ

Рубаник В.В.¹, Луцко В.Ф.¹, Рубаник В.В. мл.¹, Шакуров И.А.¹, Драбо Д.П.¹,
Беляев С.П.², Реснина Н.Н.²

¹ ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», Витебск,
Республика Беларусь

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
iakustika@mail.ru

В последние годы для улучшения физико-механических свойств металлических стенок, изготовленных методом дуговой аддитивной наплавки WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), активно используются ультразвуковые колебания (УЗК). Это связано с тем, что при WAAM технологии — формируются крупные столбчатые зерна в структуре материала, обусловленные высокой скоростью охлаждения и значительным температурным градиентом [1,2]. Традиционные методы, такие, например, как принудительное охлаждение наплавленных слоев, хотя и снижают размер зерен, но часто приводят к возникновению дефектов (трещины, деформации, остаточные напряжения, и др.). Использование УЗК является одним из решений, которое способствует измельчению зерен и снижению внутренних напряжений без риска термических повреждений [3,4].

В работе использовалась омедненная стальная проволока марки СВ-08-Г2С диаметром 0,8 мм. Наплавка выполнялась на подложку из стали Ст3, закрепленную на титановом волновомоде посредством болтового соединения (рис. 1). Защитная газовая среда — аргон. Ультразвуковая обработка осуществлялась непосредственно в процессе наплавки с использованием генератора частотой 20 кГц и мощностью 1 кВт. Для анализа микроструктуры применяли оптическую микроскопию, а для проверки фазового состава рентгеноструктурный анализ (РСА).



Рис. 1. Вид болтового соединения и двух наплавленных слоев

Исследование поперечных срезов наплавленных слоев показало, что нижние слои стенки, независимо от применения УЗК, характеризуются мелкозернистой структурой с разноосными зернами. Это связано с повторным нагревом и рекристаллизацией при наплавке последующих слоев. В верхних слоях без УЗК (рис.2а) пре-

обладают крупные столбчатые зерна, тогда как при ультразвуковом воздействии их размер уменьшается (рис. 2б). Эффект объясняется акустической кавитацией, которая интенсифицирует зарождение новых зерен и снижает их столбчатый рост.

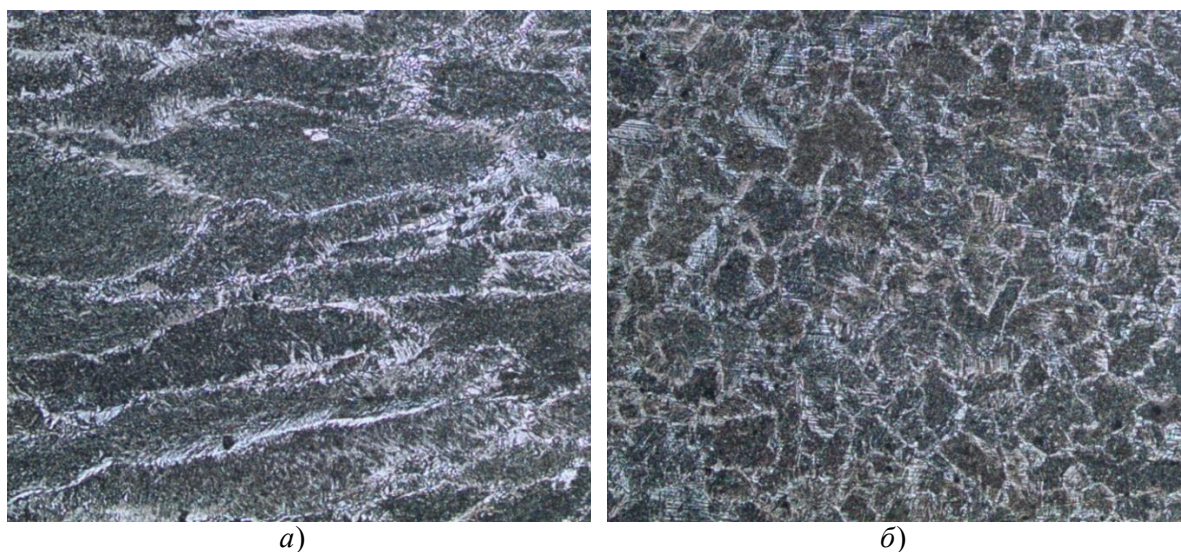


Рис. 2. Вид микроструктуры верхних слоев полученных стенок:
а – без наложения УЗК, б – с наложением УЗК

РСА подтвердил, что во всех образцах доминирует α -Fe-фаза. Интенсивность рефлекса (110) в верхних слоях без УЗО снижается в 1,5–3 раза относительно отожженного эталона, что указывает на структуру с преобладанием столбчатых зерен. При наложении УЗК разброс интенсивности уменьшается, демонстрируя более мелкую кристаллографическую структуру. Это согласуется с данными микроструктурного анализа и подтверждает роль ультразвука в снижении роста столбчатых зерен.

Таким образом, наложение ультразвука в процессе WAAM-наплавки позволяет снизить как размер зерен в наплавленных слоях так и минимизировать внутренние напряжения. Полученные результаты открывают перспективы для управления микроструктурой аддитивно изготовленных деталей без использования энергозатратных методов постобработки. Дальнейшие исследования планируется направить на оптимизацию параметров УЗО (частота, амплитуда) и оценку влияния модифицированной структуры на физико-механические свойства в наплавленных слоях.

Работа выполнена в рамках совместного проекта СПбНЦ (№ 23-РБ-09-43) и БРФФИ (№ T24СП6Г-008).

1. T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, et al., Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, Volume 92, 2018, Pages 112-224.
2. Asala, G., Khan, A.K., Andersson, J. et al. Microstructural Analyses of ATI 718Plus Produced by Wire-ARC Additive Manufacturing Process. *Metall Mater Trans A* 48, 4211–4228 (2017).
3. Бикбаев Р.М.1, Глухов М.Ю., Рубаник В.В. мл., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Беляев С.П. Влияние режимов ультразвукового воздействия при послойной электродуговой наплавке на структуру низкоуглеродистой стали, Материалы LXVIII международной научной конференции Актуальные проблемы прочности, С.288, 2024
4. Belyaev, S.P., Rubanik, V.V., Rubanik, V.V. et al. Anisotropy in the Mechanical Behaviour of the Low-carbon Steel Wall Produced by Wire Arc Additive Manufacturing without or Under Ultrasonic Assistance. *Crystallogr. Rep.* 69 (Suppl 1), S78–S82 (2024).

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Рубаник В.В.¹, Ломач М.С.¹, Рубаник В.В. мл.¹, Луцко В.Ф.¹, Платов С.И.²,
Дородейко В.Г.³

¹ *Институт технической акустики НАН Беларуси,
Витебск, Республика Беларусь
ita@vitebsk.by*

² *Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия*

³ *ЗАО «Медицинское предприятие Сатурн»,
Витебск, Республика Беларусь*

В настоящее время большое внимание специалистов, занимающихся созданием и исследованием новых материалов, уделяется наноструктурированным материалам. Интерес к таким материалам, которые отличаются повышенными физико-механическими свойствами, связан не только с их свойствами, но и с методами получения таких материалов. Одним из перспективных направлений создания таких материалов – применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Наиболее распространены и изучены такие методы ИПД как равноканальное угловое прессование (РКУП) [1] и кручение под высоким давлением (КВД) [2].

Главным преимуществом метода РКУП является сохранение первоначальной формы деформируемого образца, поэтому заготовка может быть подвергнута нескольким циклам прессования. РКУП как метод ИПД является эффективным для измельчения зерна, но обычно для получения равноосной и ультрамелкозернистой микроструктуры требуется не менее шести проходов, поэтому сокращение числа проходов РКУП для той же степени измельчения было бы полезным для практического применения. Для этой цели было предложено усовершенствование процесса РКУП. В институте технической акустики Национальной академии наук Беларуси разработано оригинальное устройство ультразвукового РКУП, в котором волновод с матрицей выполнен как единое целое с общей длиной, равной

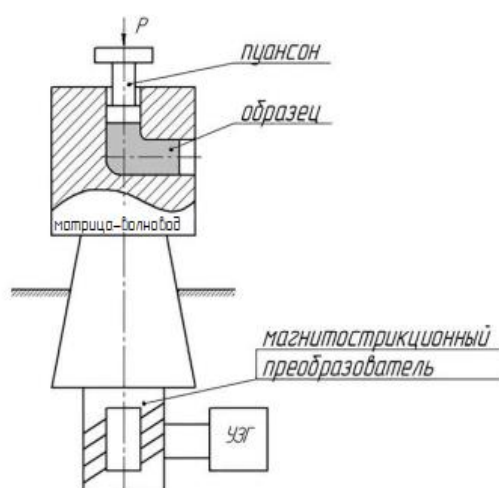
$$l = n \frac{\lambda}{2},$$

где λ – длина продольной ультразвуковой волны в материале матрицы-волновода; n – целое число, а элементы его крепления (волновода) располагают в узловой плоскости механических смещений стоячей волны, возбуждение которой происходит непосредственно в матрице и заготовке в процессе прессования [6].

Источником УЗК служил ультразвуковой генератор мощностью 4,0 кВт с магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18. Амплитуда колебаний на торце волновода-матрицы составляла до 30 мкм, частота колебаний ~18 кГц. Процесс РКУП осуществляли при температуре 20–22 °С с помощью гидравлического испытательного пресса П-10 со скоростью перемещения пуансона 4÷10 мм/с. При прессовании образцов использовали графитовую смазку.

Методика ультразвукового процесса РКУП представляла собой следующее: образец (рис. 1а) размещают во входном канале матрицы-волновода, включают ультразвуковой генератор, который формирует и подает электрические сигналы заданной частоты с регулируемой мощностью на ультразвуковой преобразователь. Ультразвуковой преобразователь преобразует эти сигналы в продольные механические колебания той же частоты, которые передаются на присоединенный к нему волновод – матрицу.

Настройками ультразвукового генератора выбирают требуемую мощность излучения (амплитуду колебаний) и резонансную частоту, обеспечивающую возникновение стоячих волн в волноводе-матрице. При помощи пресса (на рисунке 1а он не отображен) приводят в движение пуансон и осуществляют перемещение заготовки из входного канала в выходной канал. Элемент крепления при этом обеспечивает неподвижность волновода-матрицы на станине. Расположение же входного канала и выходного канала непосредственно в волноводе-матрице обеспечивает максимальное воздействие ультразвука на обрабатываемый образец. Это приводит к значительному снижению сил трения поверхности образца с поверхностями входного и выходного канала, усилия деформации, прилагаемого к пуансону.



а б
Рис. 1. Схема (а) и вид установки ультразвукового РКУП (б)

Результаты исследований показали, что применение УЗК при РКУП позволяет снизить усилие прессования от 1,5 до 4 раз в зависимости от материала образца и параметров ультразвукового воздействия. Также по сравнению с РКУП происходит более интенсивное изменение структуры: уменьшение размера зерен и их кристаллографической ориентировки. Также применение УЗК при РКУП позволяет сократить число проходов для получения необходимой структуры, что расширяет практическое применение данного способа прессования.

1. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский Ф.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 115–123.
2. Бриджмен, П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва [Текст] / Бриджмен П.В. - М: ИЛ, 1955.-444 с.
3. Пресс для равноканального углового прессования: полезн. модель ВУ 13457 / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.), М.С. Ломач, В.Ф. Луцко. Оpubл. 20.04.2024. Режим доступа: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=mod&lng=ru&page=3&target=24327>. Дата доступа: 30.04.2025.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РЕЗКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Луцко В.Ф.¹, Рубаник В.В.¹, Казьмин А.А.², Шакуров И.А.¹, Рубаник В.В. мл.¹.

¹ Институт технической акустики НАН Беларуси,
Витебск, Республика Беларусь
ita@vitebsk.by

² УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,
Гродно, Республика Беларусь

При резке многослойных или текстурированных продуктов пищевой промышленности (кексы, вафли, сыры, и др.) существующими методами изделия из них деформируются, имеют избыточный или недостаточный вес, что ухудшает товарный вид и приводит к браку. Благодаря таким преимуществам, как высокая режущая способность, меньшее налипание продукта на колеблющееся лезвие, низкий уровень потерь продукта, меньшая деформация, наименьшее разрушение для хрупких продуктов, в последние годы все более популярной в пищевой промышленности становится ультразвуковая резка. Ультразвуковая резка отличается от обычной резки, тем что режущее движение представляет собой суперпозицию обычного режущего движения лезвия и колебательного движения, создаваемого ультразвуком [1]. Типичная ультразвуковая система для резки продуктов питания включает четыре основных компонента: ультразвуковой генератор, преобразователь, бустер и нож (рис. 1) [2]. Наибольшее распространение для резки пищевых продуктов получили ножи клиновидной формы (рис. 1б).

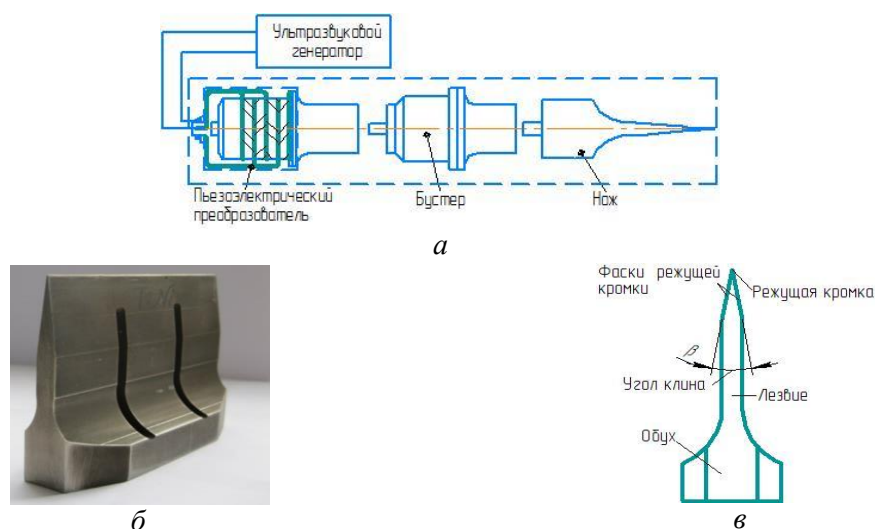


Рис. 1. Ультразвуковая система для резки продуктов питания (а); ультразвуковой нож (б) и его геометрия (в)

Ультразвуковой нож является единственной частью системы, которая уникальна для каждого процесса и обычно предназначена для работы на продольной моде колебаний в диапазоне частот 20-40 кГц. Выбор материала и конструкции ножа основывается на многочисленных критериях, включая свойства разрезаемого продукта, требуемую эффективность резания, потребление энергии, усилия, затрачиваемые на замену и очистку режущего инструмента, чтобы свести к минимуму время простоя. Существует широкий диапазон материалов, пригодных по отдельным показателям для изготовления ультразвуковых ножей: высокоуглеродистые стали, титановые сплавы, сплавы на основе алюминия и др. Наиболее подходящим материалом

для изготовления ножей являются высокопрочные титановые сплавы. К тому же, используя волноводы из титановых сплавов, можно получить наиболее высокую амплитуду на режущей кромке ножа. Также согласно экспериментальным данным [3], при длительной работе ножей амплитуда его механических колебаний может в 2 раза превышать амплитуду колебаний волноводов из высокопрочных сталей.

Особенно проблематична нарезка сложных продуктов, имеющих клейкую начинку, например, бисквитных пирожных. Из-за высоких адгезионных свойств эти продукты налипают на лезвие ножа, что приводит к размазыванию начинки и к значительной деформации разрезаемого материала. Поэтому уменьшение трения на режущей кромке и боковой поверхности ножа является основной целью при оптимизации процесса резки.

Для достижения вышеуказанной цели в ИТА НАН Беларуси было разработано ультразвуковое режущее устройство (рис. 2), состоящее из волновода с прикрепленными к нему с помощью винтов режущих лезвий. При этом толщина лезвий, выполненных в виде пластин, которых значительно меньше, чем цельных ультразвуковых ножей. Вследствие чего уменьшается площадь режущей кромки и боковой поверхности фаски ножа, что приводит к снижению трения на этих поверхностях.

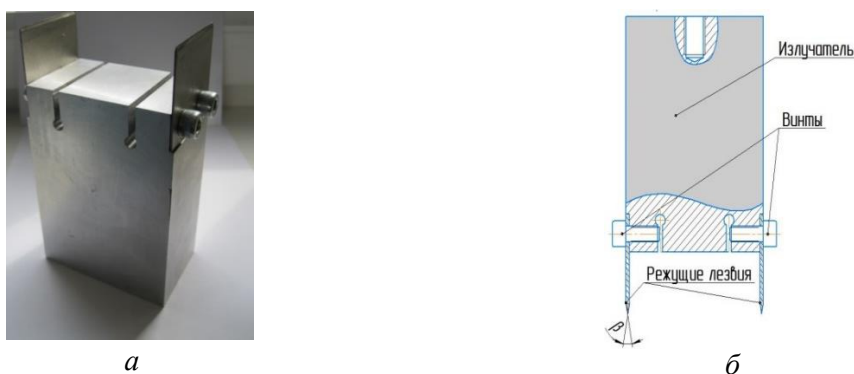


Рис. 2. Вид ультразвукового режущего устройства (а) и его схема (б)

Натурные испытания по оценке возможности применения технологии ультразвуковой нарезки на порции бисквитного полуфабриката в виде рулета и вафельных листов с начинкой на кондитерской фабрике «Витьба» (рис. 3).



Рис. 3. Фотографии нарезанных на порции бисквитного рулета (а) и вафельных листов с начинкой (б)

Испытания показали, что за счет вибрации режущей кромки и боковой поверхности ножа обеспечивается более качественный срез, уменьшается время обработки и количество отходов.

1. Schneider, Y., Zahn, S., and Rohm, H. (2011). Ultrasonic cutting of foods. In *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, (eds.) Feng, H., Barbosa, G.V., Weiss, J. Springer, New York, NY
2. Луцко В.Ф., Рубаник В.В., Кругляшов А. А. Лабетский В.С., Казьмин А.А./ Особенности проектирования ножа для систем ультразвукового реза// Перспективные материалы и технологии; стр.665 – 667
3. Lucas, M., Petzing, A. & Smith, L. J. (2001) Design and characterisation of ultrasonic cutting tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50, 149-152.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Акимов Е.Г.	11	Короткевич С.В.	23
Аксенов Д.А.	29, 90, 91	Котухов А.В.	78
Асфандияров Р.Н.	29, 90, 91	Криштал М.М.	11
Аубакирова В.Р.	90	Кулак М.М.	55
		Курлюк Е.А.	80, 82
Багрец Д.А.	5		
Баннных И.О.	21	Лбов А.А.	49
Баранникова С.А.	73	Лежнев С.Н.	19
Барсуков А.Р.	44, 46, 47, 61	Лобанов Д.С.	51
Барсуков Р.В.	42, 61	Ломач М.С.	95
Беляев С.П.	93	Луцко В.Ф.	13, 15, 93, 95, 97
Бауман Д.А.	17		
Блинова А.В.	33	Макаров С.В.	84
Богдан О.П.	33	Максименко В.Н.	87-89
Борисенко Д.Н.	63	Манохин С.С.	87-89
Бырдин В. М.	27	Маняхин И.А.	42, 44, 46, 47
		Мартынов Е.М.	57
Владыкин А. Л.	7	Марфин Е.А.	59
Войтюк Д.М.	31	Мерсон Д. Л.	7, 9, 11, 37
Волков А.Е.	18	Мерсон Е.Д.	37
Волкова Н.А.	18	Минина Н.А.	21
Вьюгинов С.Н.	49	Минчук В.С.	78, 80, 82
Вьюгинова А.А.	49	Муравьев В. В.	7
		Муравьева О. В.	7, 33
Гаврикова Д.А.	84	Мурашкин С.В.	35, 76
Гаврилюк В.А.	78	Мягих П.Н.	37
Генне Д.В.	25, 67		
Голых Р.Н.	42, 44, 46, 47, 71	Найзабеков А.Б.	19
		Неверов А.Н.	74
Данилов П.Д.	69	Неласов И.В.	87-89
Дежкунов Н.В.	78, 80, 82	Нестеров В.А.	25, 67
Дема Р.Р.	57	Нечай А.А.	40
Дородейко В.Г.	95	Нигметзянов Р.И.	39
Драбо Д.П.	93	Новик А.А.	49
		Нурмеев Д. Р.	76
Железков О.С.	57		
Жохов А.А.	63	Олешук И.Е.	80, 82
Исхакова П.В.	73	Панов Д.Ю.	17
		Парфенов Е.В.	91
Казаринов Н.А.	18	Пелаис-Барранко А.	3
Казьмин А.А.	97	Пенкин А.Г.	21
Калганов Д.А.	17	Петухов И.Б.	31
Карра Ж.-Б.	46, 47	Платов С.И.	95
Киселев Е.В.	87	Плотников В.А.	84
Колобов Ю.Р.	87-89	Полунин А.В.	11
Колобова Е.Г.	88, 89	Полуянов В.А.	37
Колтович В.А.	78	Приходько В.М.	39
Кольдюшов В.К.	39	Пузакина А. К.	27

Рааб А.Г.	29, 90
Растегаев И. А.	7, 9, 11
Растегаева И. И.	7, 9, 11
Рахматулаев А.А.	40
Редькин Б.С.	63
Реснина Н.Н.	93
Романов А.Е.	17
Россоловский А.Ю.	31
Рубаник В.В.	3, 5, 13, 15, 19, 93, 95, 97
Рубаник В.В. мл.	3, 5, 13, 15, 93, 95, 97

Савицкий В.О.	13, 15
Селиванов А.С.	35, 76, 88, 89
Селиверстова О.В.	74
Сементеева Ю.Р.	29, 90, 91
Сидоров Д.А.	35
Сливин А.Н.	61, 67
Соколов В.В.	76
Спиридонов В.А.	17
Спиридонов Н.Г.	35, 76
Староверов О.А.	53
Струнгарь Е.М.	53
Сундуков С.К.	39, 40

Теплов А.О.	21
Терентьев С.А.	25, 71
Тычинская И.Д.	31

Улитёнок А.О.	85
Урбан В.И.	5
Фатюхин Д.С.	39
Федоринчик М.П.	78
Фролов В.К.	3
Хина Б.Б.	55
Хмелев В.Н.	25, 65, 67, 69, 71
Хмелёв В.Н.	44, 46, 47
Хмелев М.В.	67
Хрусталеv А. К.	7

Царенко Ю.В.	19
Цыганок С.Н.	65, 67, 69

Чеботарева Е.А.	51, 53
Черняева Е.В.	18

Шакура В.А.	61
Шакуров И.А.	15, 93, 97
Шалунов А.В.	25, 65, 69, 71
Шафеев М.Р.	11
Шилин А.Д.	3
Шишкунова М.А.	29, 90, 91

Doan Dinh Phuong	5
Luong Van Duong	5

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Рубаник В.В., Фролов В.К., Шилин А.Д., Рубаник В.В. мл., Пелаис-Барранко А. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕССВИНЦОВОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ТИПА NBT	3
Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Багрец Д.А., Урбан В.И., Luong Van Duong, Doan Dinh Phuong МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВЕ Ti-55,16 вес.%Ni ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	5
Растегаев И.А., Хрусталева А.К., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Владыкин А.Л. ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ОТЛИВОК ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-Zn-Y-Gd	7
Растегаева И.И., Растегаев И.А., Мерсон Д.Л. ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИКОЙ ЭМИССИИ	9
Акимов Е.Г., Растегаев И.А., Шафеев М.Р., Полунин А.В., Растегаева И.И., Криштал М.М., Мерсон Д.Л. ЦИКЛИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОМ ОКСИДИРОВАНИИ Al-Mg СПЛАВА В БИПОЛЯРНОМ РЕЖИМЕ	11
Рубаник В.В., Савицкий В.О., Луцко В.Ф., Рубаник В.В. мл. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ГРАФИТА ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ	13
Луцко В.Ф., Шакуров И.А., Рубаник В.В., Савицкий В.О., Рубаник В.В. мл. УСТАНОВКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРОТОЧНЫМ МЕТОДОМ	15
Калганов Д.А., Панов Д.Ю., Спиридонов В.А., Бауман Д.А., Романов А.Е. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ БЕТА-ФАЗЫ ОКСИДА ГАЛЛИЯ	17
Волков А.Е., Черняева Е.В., Казаринов Н.А., Волкова Н.А. СРАВНЕНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО ФРАКТАЛЬНЫМ РАЗМЕРНОСТЯМ И СРАВНИТЕЛЬНЫМ ДИАГРАММАМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ	18
Царенко Ю.В. Рубаник В.В., Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ	19
Пенкин А.Г., Банных И.О., Минина Н.А., Теплов А.О. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ КОЛЁСНОЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ	21

Короткевич С.В. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОПОР КАЧЕНИЯ	23
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Генне Д.В., Нестеров В.А., Терентьев С.А. ИННОВАЦИОННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСПЫЛИТЕЛИ	25
Бырдин В.М., Пузакина А.К. ОБ ОБРАТНОВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТАХ В НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКЕ И РАДИОФИЗИКЕ	27
Сементеева Ю.Р., Аксенов Д.А., Асфандияров Р.Н., Шишкунова М.А., Рааб А.Г. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА МА2 ПОСЛЕ РКУП И ПОСТДЕФОРМАЦИОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	29
Войтюк Д.М., Россоловский А.Ю., Тычинская И.Д., Петухов И.Б. ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОНТАЖА КРИСТАЛЛОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФЛИП-ЧИП	31
Блинова А.В., Богдан О.П., Муравьева О.В. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ ЛИСТОВ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА	33
Мурашкин С.В., Селиванов А.С., Спиридонов Н.Г., Сидоров Д.А. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ЗОНЕ СВАРКИ ПОЛИПРОПИЛЕНА ОТ СТАТИЧЕСКОГО УСИЛИЯ ПРИЖИМА РАБОЧЕГО ТОРЦА ВОЛНОВОДА-ИНСТРУМЕНТА К СВАРИВАЕМЫМ ДЕТАЛЯМ	35
Полуянов В.А., Мерсон Е.Д., Мягких П.Н., Мерсон Д.Л. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА14	37
Сундуков С.К., Приходько В.М., Фатюхин Д.С., Нигметзянов Р.И., Кольдюшов В.К. КАВИТАЦИОННО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА АДДИТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ	39
Сундуков С.К., Нечай А.А., Рахматулаев А.А. ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	40
Маняхин И.А., Голых Р.Н., Барсуков Р.В. МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИСТРАЦИИ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЛОЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОЕДИНЯЕМЫХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКОЙ	42
Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Маняхин И.А., Хмелёв В.Н. ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В РЕЖИМАХ РАЗВИТОЙ И ВЫРОЖДЕННОЙ КАВИТАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ»	44
Барсуков А.Р., Голых Р.Н., Карра Ж.-Б., Маняхин И.А., Хмелёв В.Н. РЕЖИМЫ И УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССООБМЕНА ГАЗА В ЖИДКОСТЯХ КОНЕЧНОЙ ВЯЗКОСТИ	46

Маняхин И.А., Голых Р.Н., Карра Ж.-Б., Барсуков А.Р., Хмелёв В.Н. МЕТОДИКА И ОБОРУДОВАНИЕ РЕГИСТРАЦИИ УВЕЛИЧЕНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ	47
Вьюгинова А.А., Новик А.А., Вьюгинов С.Н., Новик А. А., Лбов А.А., Новик А.А. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕЗКИ УГЛЕРОДНЫХ ВО- ЛОКОН И УГЛЕПЛАСТИКА В ИННОВАЦИЯХ И ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ	49
Чеботарева Е.А., Лобанов Д.С. ВЕРИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИМИТАЦИИ ВНЕШНИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ	51
Чеботарева Е.А., Староверов О.А., Струнгарь Е.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ	53
Хина Б.Б., Кулак М.М. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА КИНЕТИКУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ВОЛНЕ СВЧ В СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ТИТАНА	55
Мартынов Е.М., Дема Р.Р., Железков О.С. РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ	57
Марфин Е.А. ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В КАРБОНАТНОМ КОЛЛЕКТОРЕ В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	59
Барсуков Р.В., Шакура В.А., Барсуков А.Р., Сливин А.Н. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКИ ПОЛИМЕРОВ В ПРОЦЕССЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ	61
Борисенко Д.Н., Жохов А.А., Редькин Б.С. ТРАНСФОРМАТОР ОДНОПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ	63
Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ	65
Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Генне Д.В., Сливин А.Н., Цыганок С.Н., Хмелев М.В. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ШВОВ	67
Шалунов А.В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Данилов П.Д. ДВУХЧАСТОТНОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЛЯ КОАГУЛЯЦИИ ДЫМА	69
Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Терентьев С.А., Голых Р.Н. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ УДАЛЕНИЕ ВЛАГИ УЛЬТРАЗВУКОМ	71
Баранникова С.А., Исхакова П.В. ОЦЕНКА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	73

Неверов А.Н., Селиверстова О.В. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА И МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	74
Спиридонов Н.Г., Мурашкин С.В., Селиванов А.С., Нурмеев Д.Р., Соколов В.В. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИЗНОСА РАБОЧИХ ТОРЦОВ ВОЛНОВОДОВ ВО ВРЕМЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	76
Минчук В.С., Гаврилюк В.А., Котухов А.В., Колтович В.А., Федоринчик М.П., Дежкунов Н.В. УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИИ И ИСПЫТАНИЙ КАВИТОМЕТРОВ	78
Курлюк Е.А., Минчук В.С., Олешук И.Е., Дежкунов Н.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ	80
Минчук В.С., Курлюк Е.А., Олешук И.Е., Дежкунов Н.В. ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ КАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВАННАХ	82
Макаров С.В., Плотников В.А., Гаврикова Д.А. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	84
Улитёнок А.О. ОБ ЭНЕРГИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ	85
Неласов И.В., Манохин С.С., Максименко В.Н., Киселев Е.В., Колобов Ю.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ТИТАНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ	87
Манохин С.С., Колобов Ю.Р., Неласов И.В., Максименко В.Н., Колобова Е.Г., Селиванов А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗОНЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕДНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ	88
Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Неласов И.В., Максименко В.Н., Колобова Е.Г., Селиванов А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ТИТАНОВЫХ ВОЛНОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИКА	89
Аксенов Д.А., Шишкунова М.А., Асфандияров Р.Н., Рааб А.Г., Сементее- ва Ю.Р., Аубакирова В.Р. ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА Mg–Zn–Zr ПУТЕМ СОВМЕЩЕНИЯ РКУП С УЛЬТРАЗВУКОМ	90
Шишкунова М.А., Аксенов Д.А., Асфандияров Р.Н., Парфенов Е.В., Се- ментеева Ю.Р. ВЛИЯНИЕ ПОСТДЕФОРМАЦИОННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПЭО-ПОКРЫТИЯ НА КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА МА14	91
Рубаник В.В., Луцко В.Ф., Рубаник В.В. мл., Шакуров И.А., Драбо Д.П., Беляев С.П., Реснина Н.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В WAAM ТЕХНОЛОГИИ	93

Рубаник В.В., Ломач М.С., Рубаник В.В. мл., Луцко В.Ф., Платов С.И., Дорodayко В.Г. УСТРОЙСТВО ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ	95
Луцко В.Ф., Рубаник В.В., Казьмин А.А., Шакуров И.А., Рубаник В.В. мл. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РЕЗКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	97
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	99
СОДЕРЖАНИЕ	101

Научное издание

ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА:
РАЗРАБОТКИ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ
(ТА-2025)

V Международная научная конференция
Тольятти, 19–21 мая 2025 года

Сборник материалов

В авторской редакции

Компьютерная верстка: *Е.В. Черняева*
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 30.04.2025. Формат 60×84/16.
Печать оперативная. Усл. п. л. 6,16.
Тираж 40 экз. Заказ № 3-141-25.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

