



СТЕНД ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАСПЛАВАХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ*

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

*Бийский технологический институт (филиал) Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский
государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
г. Бийск, Россия*

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен оптический стенд, предназначенный для исследования условий возникновения кавитационных явлений в расплавах оптически прозрачных полимерных материалов и других оптически прозрачных средах. В основе работы стенда лежит модуляция оптического излучения инфракрасного диапазона, проходящего через прозрачный полимер, за счет колебаний кавитационных пузырьков, возникающих в момент перехода изначально твердого полимера в жидкое состояние. Изучение кавитации в расплавах полимеров имеет большую практическую значимость, поскольку с одной стороны кавитация и порождаемые ею вторичные гидродинамические явления могут способствовать ускорению диффузионных процессов, протекающих на границе раздела слоистых материалов при их ультразвуковой сварке. С другой стороны, зарождающиеся кавитационные пузырьки впоследствии трансформируются в несхлопывающиеся газовые полости, наличие которых при остывании полимера ослабляет прочность сварного соединения. Таким образом, при реализации ультразвуковой сварки к факторам, определяющим качество формируемого сварного соединения, помимо амплитуды ультразвукового воздействия, силы сжатия свариваемых материалов, времени ультразвукового воздействия, можно отнести наличие или отсутствие кавитационных явлений в расплаве полимерного материала. Результатом работы стенда являются спектры сигнала с выхода оптического сенсора, которые отражают наличие или отсутствие пульсаций кавитационных пузырьков, а также частоты, на которых возникают эти пульсации.

Работоспособность стенда проверена как на жидких средах, так и на примере оптически прозрачного полимерного материала (органическое стекло). Представленный стенд позволит изучить и максимально раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимерных материалов, и, в частности, позволит выработать методы реализации ультразвуковой сварки разнородных полимерных материалов.

Ключевые слова: ультразвук; кавитационные явления; сварка; полимеры; воздействие на вещество; интенсификация диффузии; оптические измерения

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

STAND FOR OPTICAL RESEARCH OF CAVITATION PHENOMENA IN POLYMER MELTS UNDER IMPACT OF ULTRASONIC OSCILLATIONS

Barsukov R.V., Golykh R.N., Barsukov A.R., Maniakhin I.A.

*Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University,
Biysk, Russia*

ABSTRACT

The article considers an optical stand designed to study the conditions for the occurrence of cavitation phenomena in melts of optically transparent polymeric materials and other optically transparent media. The stand is based on the modulation of infrared optical radiation passing through a transparent polymer due to oscillations of cavitation bubbles that occur at the moment of initially solid polymer transition to a liquid state. The study of cavitation in polymer melts is of great practical importance, since, on the one hand, cavitation and the secondary hydrodynamic phenomena generated by it can contribute to the acceleration of diffusion processes occurring at the interface of layered materials during their ultrasonic welding. On the other hand, the emerging cavitation bubbles are subsequently transformed into non-collapsible gas cavities, the presence of which, when the polymer cools, weakens the strength of the welded joint. Thus, when implementing ultrasonic welding, the factors determining the quality of the formed welded joint, in addition to the amplitude of the ultrasonic impact, the compression force of the welded materials, the time of ultrasonic impact, can include the presence or absence of cavitation phenomena in the melt of the polymer material. The result of the stand operation is the signal spectra from the output of the optical sensor, which reflect the presence or absence of pulsations of cavitation bubbles, as well as the frequencies at which these pulsations occur.

The performance of the stand has been tested both on liquid media and on the example of an optically transparent polymer material (organic glass). The presented stand will allow you to study and maximize the potential of ultrasonic welding of polymeric materials, and, in particular, will allow you to develop methods for implementing ultrasonic welding of dissimilar polymeric materials.

Keywords: ultrasonic; cavitation phenomena; welding; polymers; effect on matter; diffusion intensification; optical measurements

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ультразвуковая (УЗ) сварка полимерных материалов является наиболее востребованным способом соединения.

Основной механизм УЗ соединения термопластичных полимерных материалов заключается в доведении соединяемых слоев до пограничной температуры между вязкопластичным и капельным состоянием за счет поглощения свариваемыми материалами УЗ энергии [1-3].

Несмотря на то, что тепловые эффекты для процесса сварки являются основой, они также могут являться причиной нежелательных явлений, таких как деструкция полимера, что снижает качество сварного соединения.

С другой стороны, рядом авторов на примере неньютоновских жидкостей, которые по своим свойствам схожи с расплавами полимеров, показано, что вторичные акустические явления (различные гидродинамические явления),

возникающие в УЗ полях высокой интенсивности, способствуют ускорению диффузионных процессов, протекающих в жидких средах [4].

На рис.1 условно показана область воздействия УЗ колебаниями на изначально твердый полимер. Воздействие на твердый полимер осуществляется при непосредственном контакте УЗ излучателя с полимерным материалом.

Вблизи точки ввода УЗ энергии в полимер можно выделить следующие зоны: 1 – зона жидкого состояния полимера; 2 – зона вязкотекучего состояния полимера; 3 – зона вязкопластичного состояния полимера; 4 – зона твердого состояния полимера.

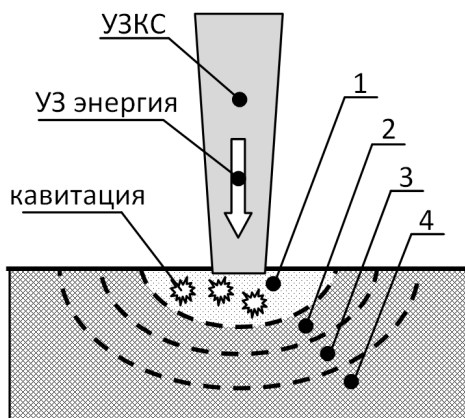


Рис.1. Условные зоны полимерного материала в процессе воздействия на него УЗ колебаниями.

Область №1 является наиболее «благоприятной» для зарождения в ней кавитационных явлений [5-7], поскольку она первой переходит в текучее состояние.

Большую практическую значимость представляют результаты исследований вклада гидродинамических эффектов (кавитация, акустические микротечения, микроструйки, релаксационные эффекты вязкости) в свойства расплавов полимеров и интенсификацию диффузии на границе слоев полимерных материалов (с одинаковыми или различными свойствами) в присутствии мощных УЗ полей входе реализации ультразвуковой сварки.

Известно, что явление кавитации в жидких средах сопровождается:

- пульсацией кавитационных пузырьков, рост и схлопывание которых происходит каждый период УЗ колебаний;
- пульсацией, так называемых, резонансных пузырьков, которые не успевают схлопнуться в фазе сжатия (например, в силу их большого размера);
- хаотичным перемещением как кавитационных, так и резонансных пузырьков в пределах кавитационного кластера.

Существует ряд методов, предназначенных для контроля кавитационных явлений: dilatометрический метод, основанный на вытеснении жидкости в капиллярную трубку из закрытого объема за счет возникновения в нем кавитационных полостей; скоростная фото- и видеосъемка кавитирующей области, которая применима только для оптически прозрачных сред; при помощи гидрофонов, размещаемых непосредственно в среде, где развивается кавитация; оптический метод, основанный на рассеянии оптического излучения на кавитационных пузырьках, который также применим только для оптически прозрачных сред; методы, основанные на кавитационной эрозии материалов

(например, тонкие металлические пленки и т.п.), размещаемых в кавитирующей среде.

Большинство перечисленных методов используются, как правило, для исследования кавитационных явлений в различных жидких средах и практически не применимы для исследования кавитационных явлений, возникающих в расплавах полимеров.

1. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Для исследования кавитационных явлений, протекающих в расплавах полимерных материалов в присутствии УЗ полей высокой интенсивности, был разработан стенд, структура которого представлена на рис.2.

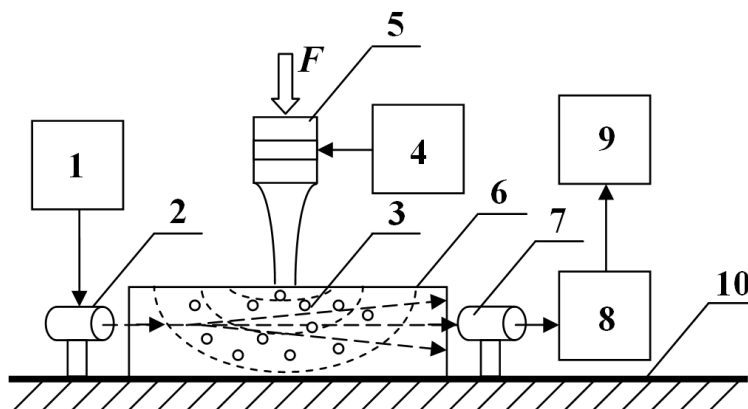


Рис.2. Структурная схема измерительного стенда.

На рис.2 показаны: 1 – источник питания источника оптического излучения; 2 – источник оптического излучения; 3 – область полимера, находящаяся в жидком состоянии с кавитационными пузырьками внутри; 4 – электронный ультразвуковой генератор; 5 – ультразвуковой излучатель; 6 – оптически прозрачный твердый полимер; 7 – приемник оптического излучения; 8 – предварительный усилитель, совмещенный с быстродействующим аналого-цифровым преобразователем; 9 – персональный компьютер с предустановленным ПО для получения спектров исследуемых сигналов; 10 – металлическая опорная поверхность; ультразвуковой излучатель 3 прижимается к полимеру с силой F .

В качестве УЗ аппаратуры были использованы электронный ультразвуковой генератор с предельной мощностью 250 Вт и ультразвуковой излучатель с преобразователем пьезоэлектрического типа с рабочим инструментом прямоугольной формы 6x20 мм. Таким образом, предельная интенсивность УЗ излучения при воздействии на полимер составила (с учетом потерь на электроакустическое преобразование) 160 Вт/см². При проведении экспериментальных исследований имеется возможность регулирования мощности УЗ воздействия в пределах от 10 до 100% от предельной мощности УЗ оборудования.

В основу работы стенда положен известный принцип [8] рассеяния оптического излучения в оптически прозрачной среде на неоднородностях, находящихся в ней, в качестве которых выступают кавитационные пузырьки.

Для получения спектров исследуемых сигналов, формируемых на выходе фотодетектора, был использован SDR приемник SunSDR2 PRO, построенный

на базе высокоскоростного АЦП LTC2209, в результате чего приемник имеет динамический диапазон около 129...130 дБ. Спектры исследуемых сигналов были получены в интересующем диапазоне частот (в полосе от 0 до 65 кГц) с применением стандартного программного обеспечения, предназначенным для работы с приемниками подобного типа.

Измерительный стенд предназначен для изучения поведения термопластичных полимерных материалов в процессе воздействия на них ультразвуковыми полями высокой интенсивности, определения условий возникновения в расплавах полимеров кавитационных явлений, параметров и характера поведения кавитационной области (концентрация, частота пульсаций отдельных пузырьков), а также для изучения поведения области УЗ воздействия после его выключения и остывания с точки зрения эволюции кавитационной области.

Стенд изначально был апробирован на оптически прозрачных жидких средах (дистиллированная вода), где возможно на длительное время сформировать стабильную кавитационную область. Для этого в качестве элемента 6 (рис.2) была использована прозрачная емкость с жидкостью, в которую был установлен УЗ излучатель, как показано на рис.3.

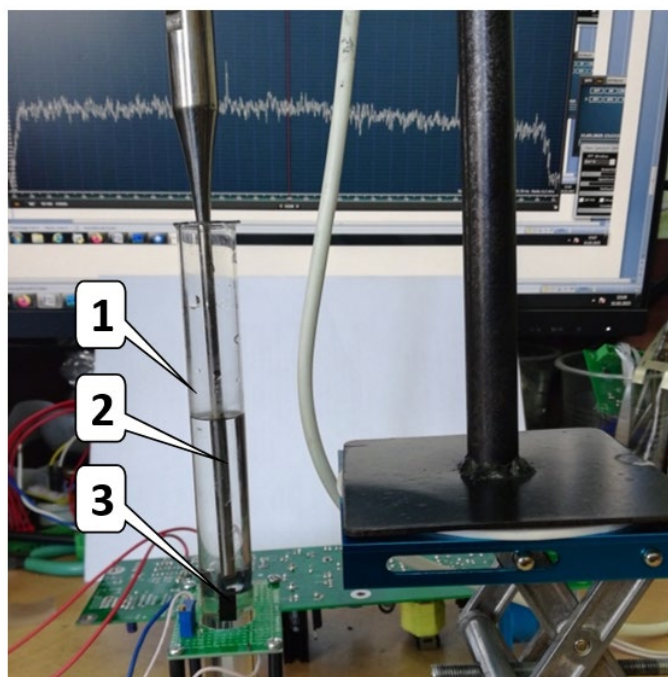
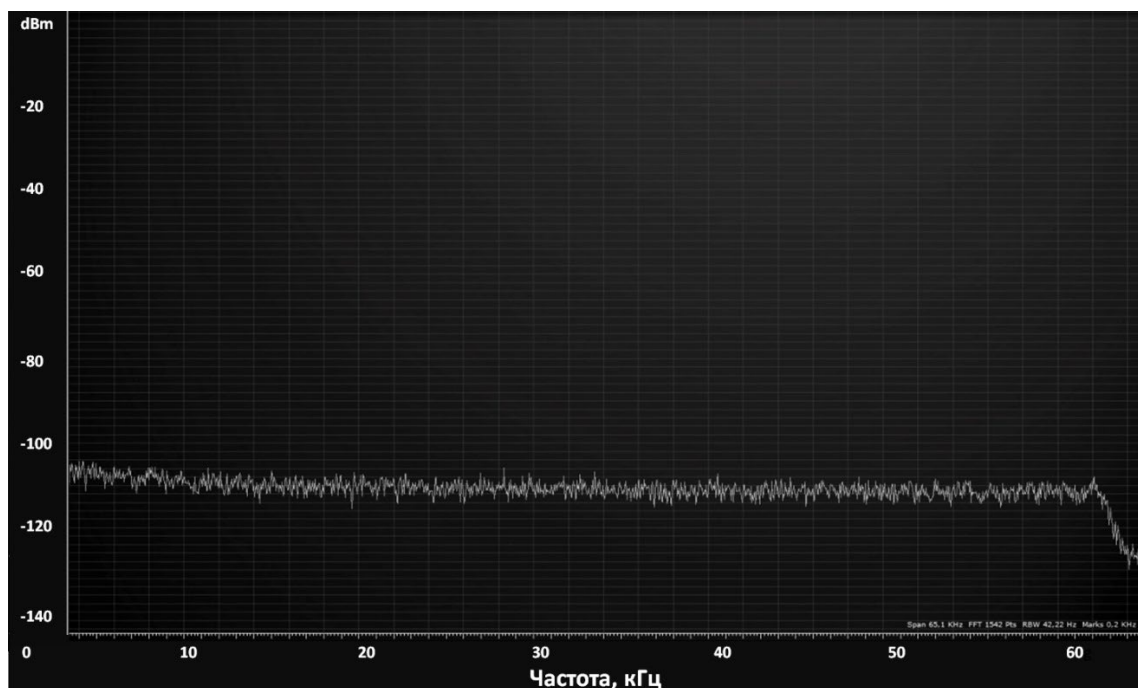


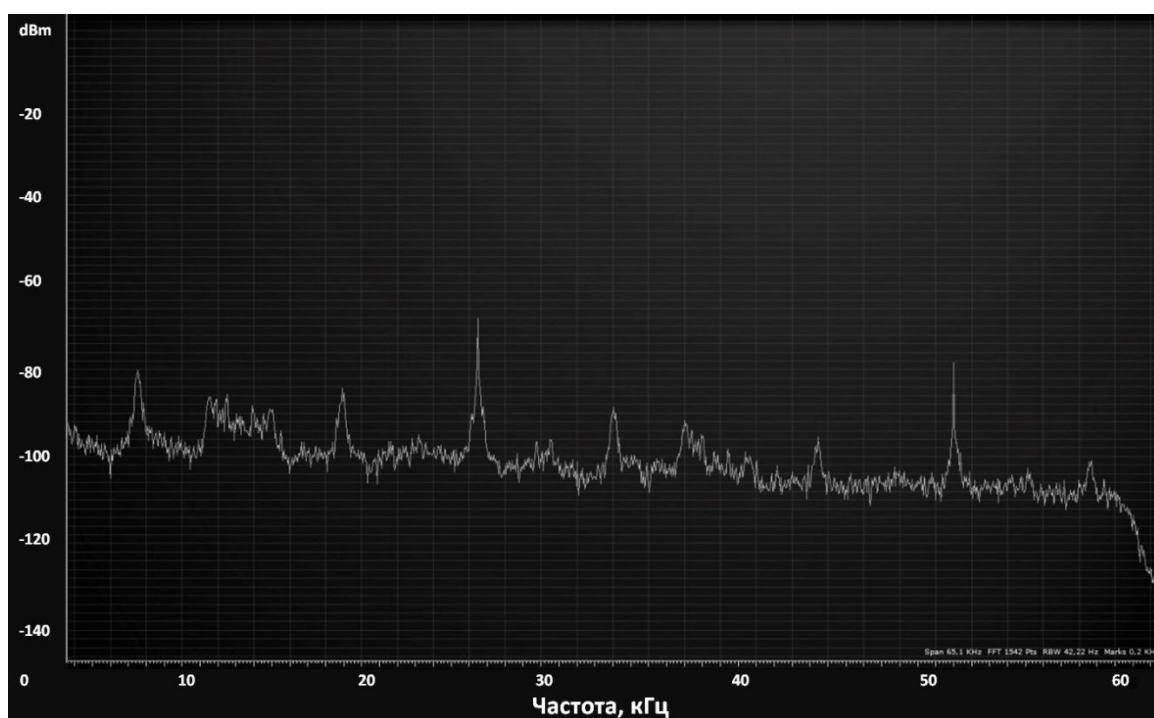
Рис.3. Фото части стенда для проведения измерений в жидкой среде. Здесь: 1 – прозрачный объем с дистиллированной водой; 2 – волновод УЗ излучателя; 3 – оптическая пара, размещенная в области зарождения кавитационного облака.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.4 показаны спектры сигнала с фотоприемника, полученные в отсутствии УЗ излучения (однородная среда) и при наличии УЗ излучения (жидкая среда, насыщенная кавитационными пузырьками).



а



б

Рис.4. Спектры сигнала: а) при отсутствии кавитации; б) в присутствии кавитации.

На спектрах, представленных на рис.4, видно, что при наличии УЗ воздействия на жидкую среду, в диапазоне 0...65 кГц наблюдается увеличение фонового шума в среднем на 12 дБм. Кроме того, наблюдается наличие ярких пиков на некоторых частотах (гармоники и субгармоники рабочей частоты УЗ излучателя), среди которых есть частота равная частоте УЗ воздействия на среду (26,3 кГц) и её вторая гармоника (52,5 кГц).

Наблюдаемый спектр обусловлен пульсациями кавитационных пузырьков, пульсациями резонансных пузырьков, перемещением резонансных и кавитационных пузырьков в объеме жидкой среды просвечиваемой ИК излучением.

Получение спектра сигнала при прохождении оптического излучения через кавитирующую область расплавленного полимера, вызывает определенные проблемы, поскольку кавитационный процесс в расплаве зарождается в определенный момент времени и длится короткое время. В связи с этим использовалась следующая методика получения экспериментальных данных:

- осуществлялась запись (оцифровка) сигнала с выхода оптического датчика с определенной частотой дискретизации в течение всего цикла воздействия на полимер (от начала УЗ воздействия до момента его деструкции);
- построение и анализ семейства спектрограмм, полученных в хронологическом порядке на временных отрезках, на которые разбивается исходный сигнал.

На рис.5-8 показаны спектры сигнала на выходе фотоприемника, полученные в разные моменты времени в процессе УЗ воздействия на твердый, оптически прозрачный полимер (от начала УЗ воздействия до момента его деструкции).

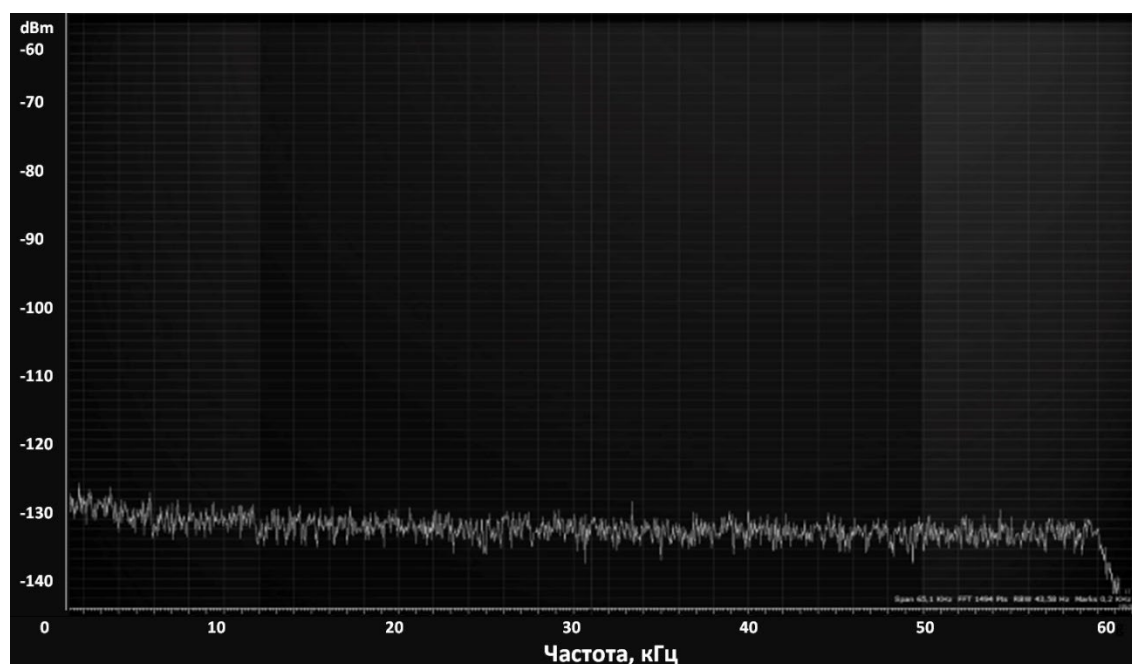


Рис.5. Спектр сигнала при отсутствии УЗ излучения.

Спектр сигнала на выходе оптического приемника, представленный на рис.5, соответствует интервалу времени, на котором отсутствует УЗ воздействие на твердый полимерный материал. В диапазоне частот 0...65 кГц он равномерный и не имеет явных всплесков и пиков.

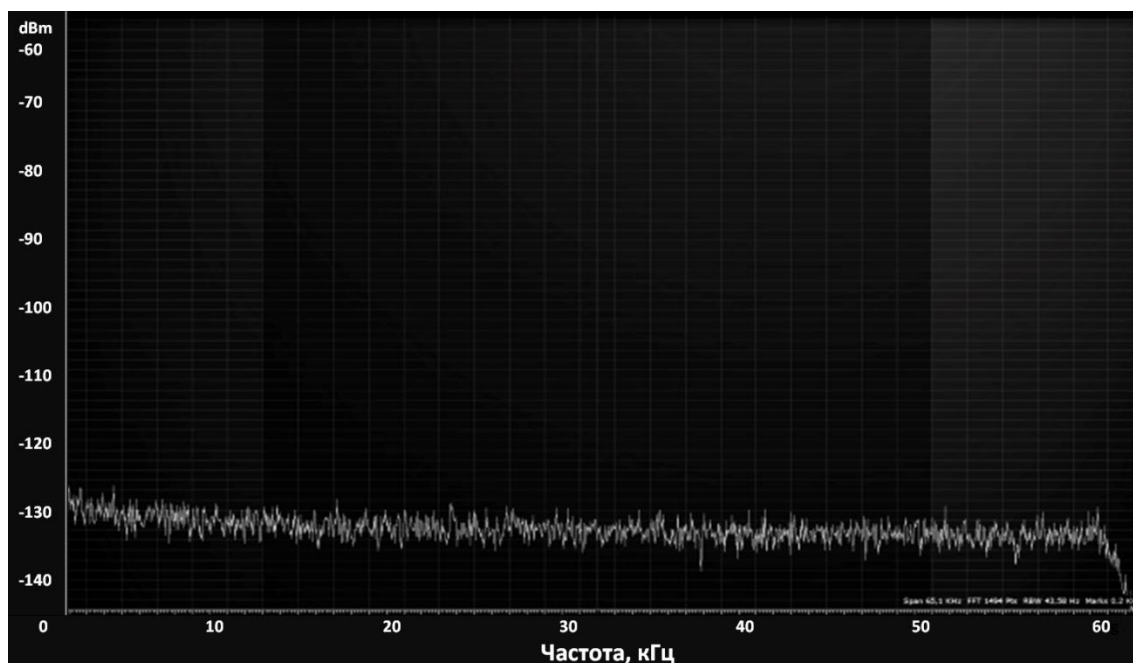


Рис.6. Спектр сигнала в процессе разогрева твердого полимера УЗ колебаниями.

Спектр сигнала на выходе оптического приемника, представленный на рис.6, соответствует интервалу времени, на котором осуществляется УЗ воздействие на твердый полимер и происходит его постепенный нагрев. В диапазоне частот 0...65 кГц он также практически равномерный и не имеет явных всплесков и пиков.

Спектры сигнала на выходе оптического приемника, представленные на рис.7,8, зафиксированы в различные моменты времени и получены во временном интервале, на котором полимер находится в жидком состоянии.

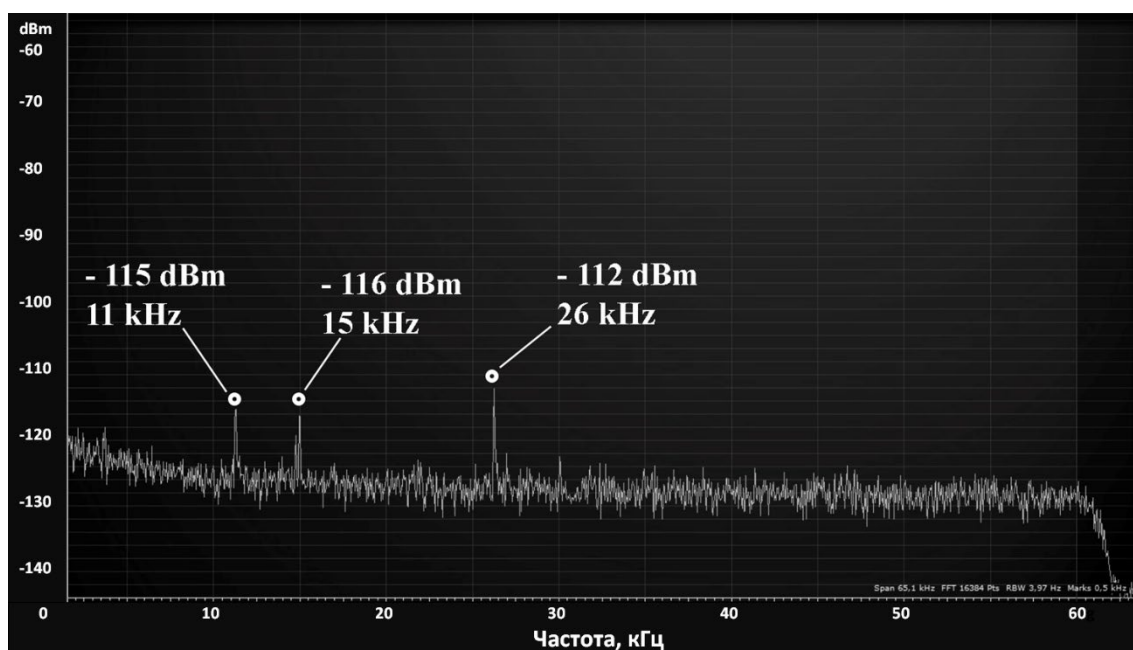


Рис.7. Спектр №1 сигнала при нахождении полимера в текучем состоянии в присутствии УЗ поля.

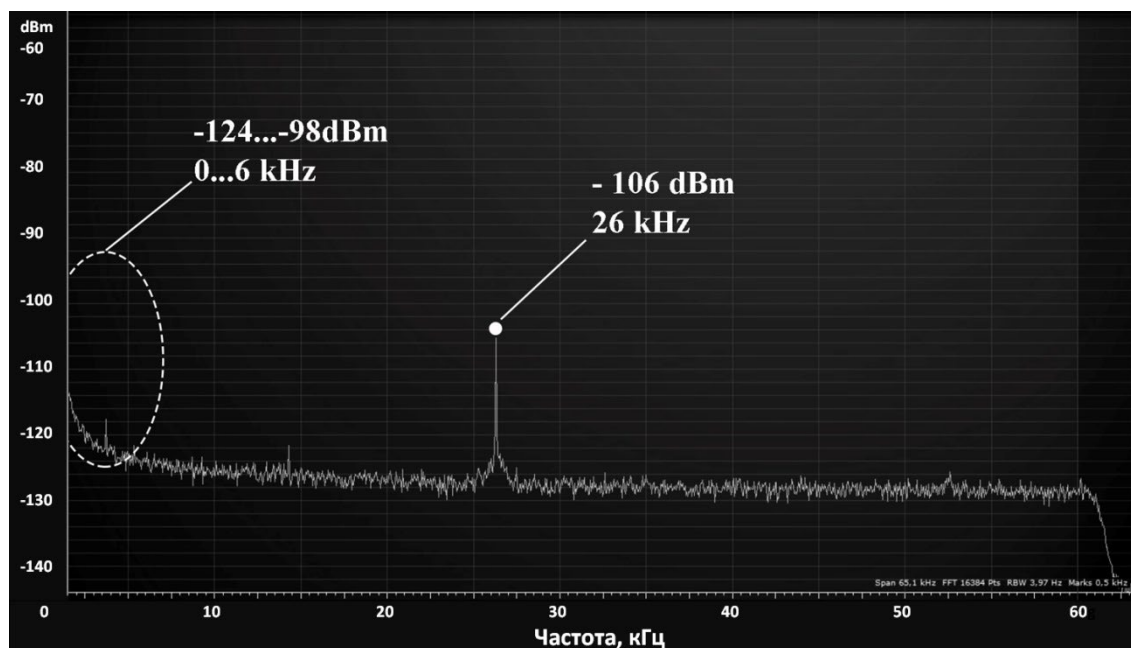


Рис.8. Спектр №2 сигнала при нахождении полимера в текучем состоянии в присутствии УЗ поля.

В данном случае наблюдаются яркие пики на частотах 11 кГц, 13 кГц, 26 кГц (см. рис.7), что может свидетельствовать только о том, что сформировались условия для зарождения кавитации в полимере и возникли пульсирующие газовые полости. Кроме того, в низкочастотной части спектра (0...6 кГц) наблюдаются изменения, которые свидетельствуют о низкочастотных колебаниях газовых полостей, обусловленных высокой вязкостью расплава полимера (см. рис.8). Спектры, представленные на рис.7,8, свойственны короткому интервалу времени (около 50-100 мс), поскольку дальнейший ввод ультразвуковой энергии в зону УЗ воздействия приводит к росту газовых полостей, которые не успевают коллапсировать, и, в итоге, перестают пульсировать вообще.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проделанной работы стал измерительный стенд, предназначенный для проведения оптических исследований кавитационных явлений в расплавах полимеров при воздействии на них ультразвуковыми колебаниями. Работоспособность стенда была апробирована в ходе воздействия УЗ колебаниями высокой интенсивности на образец оптически прозрачного полимера (органическое стекло).

Для оптически непрозрачных сред данный стенд неприменим. Однако, опираясь на результаты исследований оптически прозрачных полимеров, и предположение о подобном поведении оптически непрозрачных сред в УЗ полях высокой интенсивности (что требует дополнительных исследований), можно будет управлять кавитационным процессом при УЗ сварке любых полимерных материалов.

Измерительный стенд позволит выявить условия зарождения кавитационных явлений в расплавах полимеров в присутствии УЗ полей высокой интенсивности, провести исследования влияния кавитационных явлений на диффузионные процессы на границе полимерных слоев в ходе ультразвуковой

сварки т.е. оценить, в конечном итоге, их вклад в процесс УЗ сварки, развить существующий математический аппарат, описывающий этот процесс.

С другой стороны, изучение кавитационных явлений в расплавах полимеров при помощи разработанного стенда позволит определить условия зарождения в расплаве полимера резонансных (не схлопывающихся) пузырьков, которые далее трансформируются в застывшие газовые полости, наличие которых снижает прочность формируемого, при ультразвуковой сварке, соединения.

Использование созданного стенда позволит максимально раскрыть потенциал ультразвуковой сварки полимеров, в том числе при сварке разнородных полимерных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько В.М. и др. *Ультразвук в комбинированных технологиях машиностроения* // Научно-технические технологии электро-физикохимической и комбинированной обработки. – 2020. – №9. – С.21-26.
2. Охлопкова Т.А. и др. *Технология жидкофазного совмещения сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наночастицами неорганических соединений под действием ультразвуковых колебаний* // Журнал прикладной химии. – 2016. – Т.89. – №9. – С.1179-1186.
3. Benatar A., Marcus M. *Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites* // Power Ultrasonics (Second Edition). – 2023. – Pp.205-225.
4. Unnikrishnan T.G., Kavan P. *A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites* // Materials Today Proceedings. – 2015. – Vol.56. – No.7. – Pp.3294-3300.
5. Kumar R.K., Omkumar M. *Investigation of ultrasonic welding of carbon fiber reinforced thermoplastic to an aluminum alloy using a interfacial coating* // Materials and Manufacturing Processes. – 2021. – Vol.36. – No.11.
6. Villegas I.F. *Ultrasonic welding of thermoplastic composites* // Frontiers in Materials. – 2019. – Vol.6.
7. Titahun S. et al. *A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties* // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol.988. – Iss.1. – e012113.
8. Гриб А.Ф., Котухов А.В., Жарко Н.А., Федоринчик М.П., Дежкунов Н.В. *Применение рассеяния лазерного света для оценки скорости растворения зародышей кавитации* / XIII Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника – 2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии». Сборник трудов. – Минск: Изд-во БГУИР, 2022. – С.326-330.

REFERENCES

1. Prihod'ko V.M. et al. *Ul'trazvuk v kombinirovannykh tekhnologiyakh mashinostroeniya* [Ultrasonic in combined engineering technologies]. Nauchyomkie tekhnologii ehlektro-fizikokhimicheskoy i kombinirovannoy obrabotki, 2020, No.9, Pp.21-26.
2. Ohlopko T.A. et al. *Tekhnologiya zhidkofaznogo sovmeshheniya sverkhvysokomolekulyarnogo poliehtilena s nanochastitsami neorganicheskikh soedinenij pod dejstviem ul'trazvukovykh kolebanij* [Technology of liquid-phase combination of ultra-high molecular weight polyethylene with nanoparticles

of inorganic compounds under the influence of ultrasonic vibrations]. Zhurnal prikladnoj khimii, 2016, Vol.89, No.9, Pp.1179-1186.

3. Benatar A., Marcus M. *Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites*. Power Ultrasonics (Second Edition), 2023, Pp.205-225.
4. Unnikrishnan T.G., Kavan P. *A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites*. Materials Today Proceedings, 2015, Vol.56, No.7, Pp.3294-3300.
5. Kumar R.K., Omkumar M. *Investigation of ultrasonic welding of carbon fiber reinforced thermoplastic to an aluminum alloy using a interfacial coating*. Materials and Manufacturing Processes, 2021, Vol.36, No.11.
6. Villegas I.F. *Ultrasonic welding of thermoplastic composites*. Frontiers in Materials, 2019, Vol.6.
7. Titahun S. et al. *A review on ultrasonic welding of various materials and their mechanical properties*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, Vol.988, Iss.1, e012113.
8. Grib A.F., Kotuxov A.V., Zharko N.A., Fedorinchik M.P., Dezhkunov N.V. *Primenenie rasseyaniya lazernogo sveta dlya otsenki skorosti rastvoreniya zarodyshej kavitatsii [Application of laser light scattering to estimate the dissolution rate of cavitation nuclei]*. XIII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Medehlektronika – 2022. Sredstva meditsinskoj ehlektroniki i novye meditsinskie tekhnologii". Sbornik trudov. Minsk, Izdatel'stvo BGUIR, 2022, Pp.326-330.

Поступила в редакцию 14 мая 2025 года.

Сведения об авторах:

Барсуков Роман Владиславович – к.т.н., доц. Кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: roman@bti.secna.ru

Гольх Роман Николаевич – д.т.н., проф. Кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: grn@bti.secna.ru

Барсуков Александр Романович – асп., ст. преподаватель Кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: barsukov.ar@bti.secna.ru

Маняхин Иван Александрович – асп., преподаватель Кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия; e-mail: maniakhin.ia@bti.secna.ru