

# Разработка Ультразвукового Инструмента для Сварки Тонкостенных Изделий

Владимир Н. Хмелёв, *Senior Member*, IEEE, Виктор. А. Нестеров, Алексей Н. Сливин, Андрей В. Шалунов

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

**Аннотация**—в статье представлены результаты моделирования процесса ультразвуковой кольцевой сварки тонкостенных изделий из полимерных материалов, герметизации аккумуляторов холода. Разработан аппарат и ультразвуковая колебательная система для формирования кольцевого сварного шва со специальным демпфирующим устройством, исключаящим нежелательную концентрацию механических колебаний и деструкцию в центральной области тонкостенного материала крышки аккумулятора холода.

**Ключевые слова**—Ультразвук, сварка, тонкостенные изделия, аккумулятор холода, кольцевой шов, герметизация

## I. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость создания надежных и герметичных соединений различных изделий требует непрерывного совершенствования технологии ультразвуковой сварки.

Среди многообразия различных вариантов ультразвуковой сварки значительное место занимает соединение изделий из тонколистовых термопластичных материалов кольцевыми швами.

Анализ возможностей ультразвукового способа сварки тонколистовых термопластичных материалов позволил установить, что при формировании замкнутого кольцевого сварного шва небольшого размера (диаметром 10-60 мм) происходит разрушение материала центральной области верхнего привариваемого слоя.

Одним из примеров такого сварного соединения является способ формирования герметичного неразъемного соединения крышек с емкостями, предназначенными для длительного хранения различных жидкостей при производстве аккумуляторов холода (заполняемых водопроводной водой или специальными гелями). На рис. 1. представлено фото типичного аккумулятора холода.

Одним из наиболее эффективных способов создания неразъемного герметичного соединения крышки и заливной горловины емкости является ультразвуковая сварка.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Однако, при реализации сварного соединения в процессе ультразвуковой сварки крышки происходит ее разрушение (прогар). На рис. 2. представлено типичное фото разрушенной крышки.



Рис.1. Фото аккумулятора холода.



Рис. 2. Фото разрушенной крышки аккумулятора холода.

Причиной разрушения являются механические колебания изделия, возникающие в материале крышки и приводящие к локальному повышению температуры и разрушению материала крышки.

Наличие таких локальных разрушений неприемлемо и поэтому возникла необходимость разработки и создания специализированного ультразвукового инструмента и оборудования, для производства тонкостенных изделий, в которых соединение обеспечивается за счет формирования замкнутых сварных швов.

При этом разработанное оборудование должно обеспечивать максимальную прочность (при необходимости герметичность) сварного шва без разрушения тонкостенного изделия.

Для практической реализации специализированного ультразвукового оборудования необходимо решить следующие технические задачи:

1. Провести моделирование процесса воздействия ультразвукового сварочного инструмента на свариваемый объект. Провести анализ результатов моделирования, выявить причины возникновения прогаров и предложить способ, исключающий разрушение свариваемого объекта.

2. Предложить и разработать ультразвуковой сварочный инструмент, позволяющий реализовать предложенный способ воздействия, исключающий разрушение свариваемого тонкостенного объекта.

3. Для обеспечения электрического питания колебательных систем необходимо разработать электронный блок – генератор ультразвуковых колебаний с автоматическим управлением, обеспечивающим ультразвуковое воздействие в оптимальном режиме.

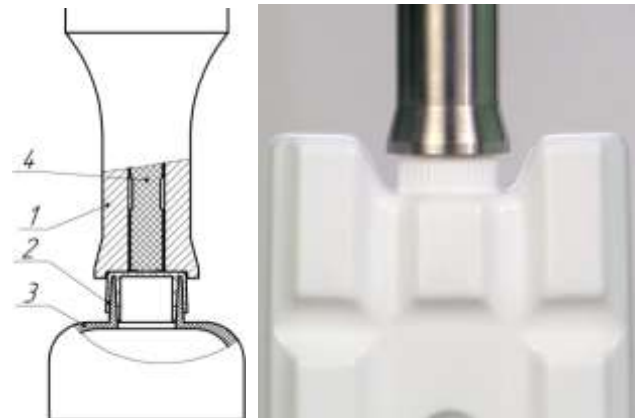
4. Провести экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность предложенного способа воздействия, исключающего разрушение свариваемого объекта.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

При построении модели, ее анализе и разработке оборудования, обеспечивающего сваривание тонколистовых материалов по замкнутому контуру без разрушения, в качестве объекта воздействия был выбран аккумулятор холода, представляющий собой ёмкость, к заливной горловине которой необходимо герметично приваривать крышку (Рис. 3.).

Для установления причин возникновения разрушающих механических колебаний было проведено моделирование процесса, результаты которого представлены на рисунке 4.

При этом установлено, что амплитуда колебаний в центре крышки многократно превышает амплитуду колебаний УЗ сварочного инструмента (более чем в 4 раза). Анализ результатов моделирования показал, что областью разрушения тонкого дна крышки является зона с максимальной амплитудой колебаний и это является причиной разрушения крышки при ультразвуковой сварке [1-2].



1 – сварочный инструмент; 2 – крышка; 3 – аккумулятор холода; 4 – демпфирующее устройство механических колебаний; Рис. 3. Эскиз и фото сварочного инструмента.

Для снижения амплитуды колебаний было предложено исключить нежелательные колебания свариваемого объекта специальным устройством – демпфером. Учитывая, что демпфер невозможно установить внутри свариваемого объекта, было предложено расположить его внутри сварочного инструмента. При этом, обеспечен прижим демпфирующего устройства к центральной области дна крышки, в области высоких механических колебаний.

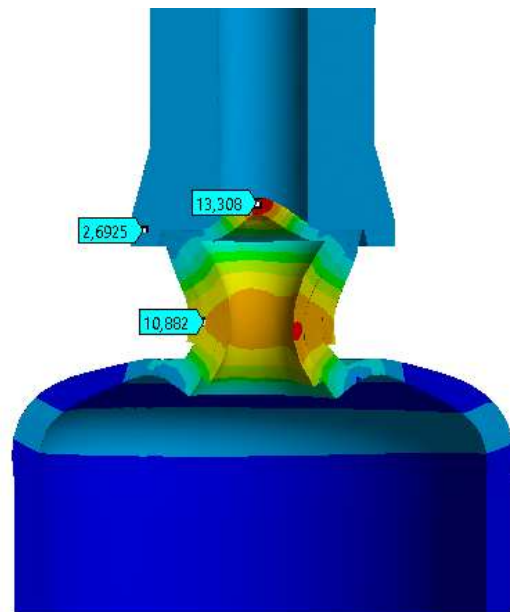


Рис. 4. Результаты моделирования воздействия ультразвукового сварочного инструмента на свариваемый объект.

Для анализа амплитуд объекта было проведено сравнительное моделирование. При этом концентрично сварочному инструменту был установлен демпфер механических колебаний.

На рис. 5. представлены результаты моделирования воздействия ультразвукового сварочного инструмента на свариваемый объект при наличии демпфера механических колебаний.

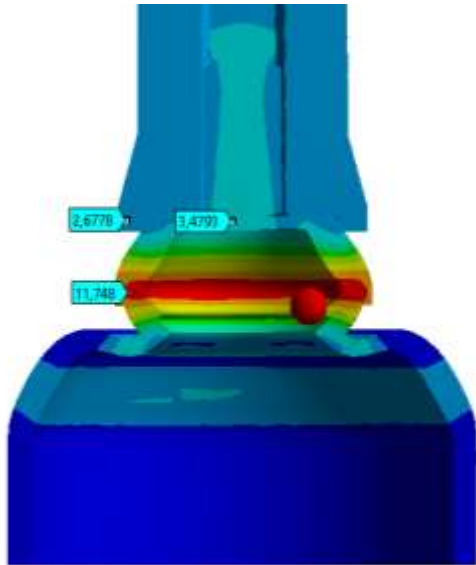


Рис. 5. Результаты моделирования воздействия ультразвукового сварочного инструмента с установленным демпфером механических колебаний.

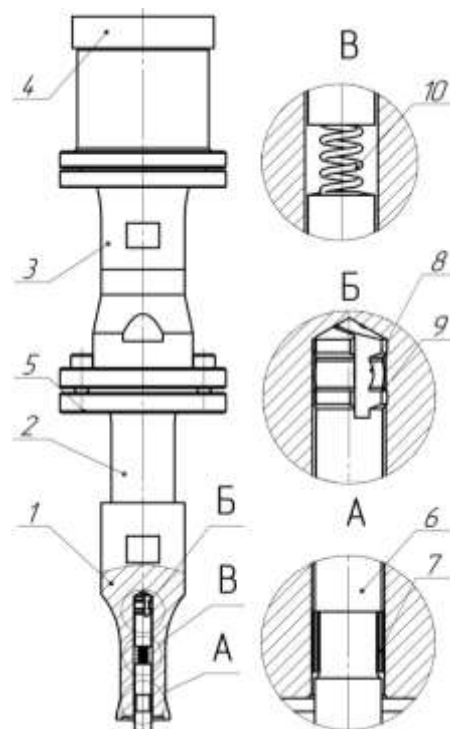
Из полученных результатов следует, что установка демпфирующего устройства внутри сварочного инструмента позволяет снизить более чем в 4 раза амплитуду колебаний в центре дна крышки и значительно уменьшить ее в сравнении с амплитудой колебаний сварочного инструмента. При этом, степень демпфирования зависит как от конструкции крышки (толщины дна, наличия ребер жесткости), так и от усилия прижима демпфирующего устройства к крышке. В случае прижима демпфирующего элемента с оптимальным усилием удалось исключить нежелательные колебания, приводящие к разрушению изделия.

Поскольку, в случае с аккумулятором холода, невозможно поместить сварочную опору внутри закрытой емкости был разработан и изготовлен сварочный инструмент с демпфирующим устройством, установленным внутри инструмента. Прижим демпфера к свариваемому объекту с определенной силой обеспечивался за счет установленной внутри инструмента пружины.

Для подтверждения эффективности воздействия демпфирующего устройства при герметичном соединении крышки аккумулятора холода с заливной горловиной было разработано и изготовлено специализированное ультразвуковое оборудование, состоящее из ультразвуковой колебательной системы (Рис.6.) и электронного блока.

Колебательная система состоит из сварочного инструмента (поз. 1), концентратора (поз. 2), пьезоэлектрического преобразователя (поз. 3). Рабочий сварочный инструмент имеет специальную форму для соосной центровки крышки со сварочным инструментом [3]. Вентилятор (поз. 4) необходим для охлаждения пьезоэлектрического преобразователя в

случае непрерывной работы УЗКС в автоматизированном производстве.



1 – сварочный инструмент; 2 – концентратор; 3 – пьезоэлектрический преобразователь в корпусе; 4 – вентилятор; 5 – крепежный фланец; 6 – демпфер механических колебаний; 7, 9 – силиконовая трубка; 8 – фиксатор; 10 – пружина

Рис. 6. Эскиз конструкции разработанной ультразвуковой колебательной системы.

Крепежный фланец (поз. 5) расположен в области минимальных механических колебаний концентратора и обеспечивает минимальное демпфирование ультразвуковой колебательной системы.

Демпфирующее устройство состоит из демпфера механических колебаний (поз.6), силиконовых трубок (поз.7,9), фиксатора (поз.8) и пружины (поз.10)

Созданная ультразвуковая колебательная система обеспечивает равномерное распределение амплитуды колебаний порядка 70-75 мкм по всей поверхности рабочего инструмента. Это является необходимым и достаточным условием для формирования сварочного шва при ультразвуковом воздействии на термопластичные материалы [4-6].

На рис.7. представлен ультразвуковое оборудование для сварки изделий из тонкостенных термопластичных материалов, герметичной сварки крышек аккумулятора холода.

Основными параметрами, определяющими качество ультразвуковой сварки, являются: амплитуда ультразвуковых колебаний, величина усилия сжатия, интервал времени ультразвукового воздействия и интервал времени удержания свариваемых материалов [7,8].



Рис.7. Разработанный аппарат для сварки крышек аккумулятора холода.

При выборе технологических режимов и параметров сварки нужно учитывать, что интенсивность выделяемой ультразвуковой энергии в зоне сварки, в результате поглощения ультразвуковых колебаний зависит от акустического контакта и площади вводимой энергии. На акустический контакт огромное влияние оказывает величина усилия сжатия, т.е. обеспечение равномерного усилия прижима излучающей поверхности рабочего инструмента по всему контуру кольцевого сварного шва [9,10]. Практические результаты, подтверждающие выбор оптимальных параметров процесса ультразвуковой сварки изделий с кольцевыми сварными швами реализованы в ультразвуковом оборудовании [11-13].

В процессе отработки технологических параметров процесса сварки, изготовленным оборудованием, установлено, что наилучшее качество сварных соединений достигается при величине усилия сжатия 470-500Н, амплитуды колебаний 70-75 мкм, и времени ультразвукового воздействия 0,75-1 сек.

Герметичность сварного соединения проверялась следующим способом: сваренный аккумулятор холода заполнялся водой через горловину, затем на горловину накручивается крышка и далее крышка герметично приваривалась к горловине аккумулятора холода. Далее аккумуляторы холода подвергали замораживанию и размораживанию. После размораживания проводилось надавливание на аккумулятор холода, при этом создавалось внутреннее избыточное давление, таким образом, проверялась герметичность и надежность сварного соединения. В результате проведенных экспериментальных исследований по сварке 50 аккумуляторов холода установлено, что обеспечивается 100% герметичность свариваемых изделий.

В таблице 1 представлены технические характеристики, разработанного аппарата, представленного на рис.7.

ТАБЛИЦА I

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Напряжение питающей электрической сети, В	220±20
Частота напряжения питающей электрической сети, Гц	50±0,1
Мощность, потребляемая от электрической сети, ВА, не более	1000
Номинальная частота ультразвуковых колебаний, кГц	22±1,65
Время ультразвукового воздействия в цикле сварки, с	0,75-1
Габаритные размеры электронного блока, мм	270х 500х 120
Габаритные размеры колебательной системы, мм	Ø80х 300
Масса электронного блока, кг, не более	12
Вес колебательной системы, кг, не более	3
Амплитуда колебаний на торцевой поверхности рабочего инструмента при максимальной мощности, мкм, не менее	70-75

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований решена проблема разрушения поверхности соединяемых кольцевой сваркой изделий, разработано и изготовлено специализированное ультразвуковое оборудование для сварки изделий из тонкостенных термопластичных материалов, которое обеспечивает надежное герметичное соединение по замкнутому контуру. При его создании решены следующие технические задачи:

- проведено моделирование процесса воздействия ультразвукового сварочного инструмента на крышку аккумулятора холода, позволившее выявить причины прогара материала и предложить способ, исключающий разрушение свариваемого объекта.
- для реализации предложенного способа разработана конструкция ультразвуковой колебательной системы для формирования кольцевого сварного шва со специальным демпфирующим устройством, исключающим нежелательную концентрацию механических колебаний в центральной области тонкостенного материала крышки аккумулятора холода;
- разработан электронный блок – генератор ультразвуковых колебаний и блок автоматического управления, обеспечивающий работу электронного генератора в оптимальном режиме;
- проведены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность предложенного способа воздействия и возможность исключения разрушения изделий из тонкостенных термопластичных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Голованов, А.И. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций / А.И. Голованов, О. Н. Тюленева, А. Ф. Шигабутдинов // Физматлит. – М.: 2006. – 392 с.
- [2] Якушев, В.Л. Нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек / В.Л. Якушев // Наука. – М.: 2004. – 276 с.
- [3] Stepanenko, D.A. Theoretical substantiation of the possibility of amplifying ultrasonic vibrations with the help of compound ring elastic elements / D.A. Stepanenko [et al.]. // Technical acoustics. – 2017. – № 17. – P. 2–14.
- [4] State Standard 32491–2013 Geosynthetic materials. Method of tension test with the application of broad tape – М.: Standard publishing, 2014.
- [5] State Standard 17527-2003 Packaging. Terms and Definitions. – М.: Publishing house of standards, 2003.
- [6] Babichev, A.P. Physical quantities. Handbook / A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratovsky, et al. –М.: Energoatomizdat, – 1991. – 1232 p.
- [7] Khmelev, V.N. Ultrasonic welding of thermoplastic materials: monograph / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov, S.S. Khmelev; under the editorship of V.N. Khmelev. – Altay State Technical University, BTL. – Biysk: Altay State Technical University publishing, 2014. – 281 p.
- [8] Kholopov, Yu.V. Ultrasonic welding of plastics and metals / Yu.V. Kholopov. – L.: Mechanical Engineering. Leningrad Dep. 1988. – 224 pp.
- [9] Shestopal, A.N. Handbook of welding and bonding plastics / AN. Shestopal, Yu.S. Vasiliev – Kiev: Technique, 1986. – 202 p.
- [10] Mozgovoy, I.V. The basis of the technology of ultrasonic polymer welding: study guide / I.V. Mozgovoy. – Publishing house of Krasnoyarsk University, 1991. – 280 p.
- [11] Way of sealing of plastic storage containers and processing of components of blood / RU Patent 2269334 / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, A.N. Slivin // 10.02.06.
- [12] Khmelev, V.N. Development of the ultrasonic equipment for packing machines / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov, I.I. Savin, S.V. Levin // Izvestya of Tula state University. – 2006. – № 6. – pp. 12–18.
- [13] Khmelev, V.N. Development of technology and equipment for ultrasonic welding of elements of a cartridge for water purification / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, S.V. Levin // Izvestya of Tula state University. – 2004. – № 2. – pp. 175–182.



technological processes.

**Vladimir N. Khmelev** (SM'04) is deputy director for scientific and research activity at Biysk technological institute, professor and lecturer, Full Doctor of Science (ultrasound), honored inventor of Russia, laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering, IEEE member since 2000, IEEE Senior Member since 2004. His scientific interests are in field of application of ultrasound for an intensification of various



**Viktor A. Nesterov** has got a higher education on information measuring engineering and technologies from Altay State Technical University. He is engineer in Biysk Technological Institute. His research interests is finite-element modeling and designing ultrasonic oscillation system



**Alexey N. Slivin** has got engineer's degree at 1999 and Philosophy degree (Candidate of Engineering Sciences) at 2009. He is leading specialist in designing, making of electronic ultrasonic generation devices in developing of ultrasonic technological equipment for thermoplastic polymeric materials welding, laureate of Altay Region premium in the field of science and technique (2009), docent and lecturer in Biysk Technological Institute. His research interests are in field of ultrasonic equipment and

technologies and in applying of high intensive ultrasonic vibrations for intensifying of technological processes and for changing of materials and substances properties and in applying of ultrasonic vibrations for welding of thermoplastic polymeric materials.



**Andrey V. Shalunov** has got engineer's degree at 2003 and Philosophy degree (Doctor of Engineering Sciences) at 2013. He is leading specialist in designing of interface systems of ultrasonic technological equipment and other devices, docent and lecturer in Biysk Technological Institute, laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering. His research interests are in designing of ultrasonic technological

equipment and in applying of ultrasonic vibrations of high intensity for intensifying of technological processes and for changing of materials and substances properties, constructing of technological assemblies for ultrasonic technologies realization.