

УДК 621.791.19

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-52-60

Применение пьезокерамических преобразователей для ультразвуковой сварки синтетических тканей

С.С. Волков, В.М. Неровный, Н.В. Коберник, Ю.А. Михайлова

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Piezo-ceramic transducer introduction in the synthetic fabrics ultrasonic welding

S.S. Volkov, V.M. Nerovniy, N.V. Kobernik, J.A. Mikayilova

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены высокодобротные акустические системы для ультразвуковой сварки синтетических тканей. Описаны материалы, из которых их изготавливают. Проведены работы, направленные на снижение вводимой в свариваемые изделия акустической мощности при ультразвуковой сварке синтетических тканей. Установлено, что применение малогабаритных пьезокерамических преобразователей для сварки синтетических тканей позволяет повысить эффективность и добротность колебательной системы с малыми собственными потерями. Показано, что для увеличения производительности ультразвуковой сварки и снижения акустической мощности необходимо конструировать ультразвуковые генераторы с автоподстройкой на заданную амплитуду колебаний. Рассмотрены технологические возможности шовной ультразвуковой сварки с применением высокоэффективных пьезокерамических преобразователей по свариваемости лавсановых, капроновых и полипропиленовых тканей. Выполнен сравнительный анализ по производительности ультразвуковой сварки синтетических тканей при использовании пьезокерамических и никелевых преобразователей. Определены основные параметры режима ультразвуковой сварки тканей для пьезокерамических преобразователей. Показано, что параметры режима ультразвуковой сварки синтетических тканей существенно влияют на скорость достижения максимальных температур в зоне сварного соединения, определяя интенсивность разогрева, а, следовательно, и производительность сварки.

Ключевые слова: синтетические ткани, ультразвуковая сварка, пьезокерамический преобразователь, амплитуда колебаний волновода, автоподстройка частоты, акустическая нагрузка, скорость сварки

The paper considers high-quality acoustic systems for ultrasonic welding of the synthetic fabrics. Materials, from which they are manufactured, are presented. Work was performed aimed at reducing acoustic power introduced into the welded products at ultrasonic welding of the synthetic fabrics. It was established that introduction of the small-sized piezo-ceramic transducers in welding the synthetic fabrics made it possible to increase efficiency and quality factors of the oscillatory system with low intrinsic losses. It is shown that to increase the ultrasonic welding productivity and reduce the acoustic power, it is necessary to design ultrasonic generators with the auto-tuning to a given oscillation amplitude. Technological opportunities are being considered of seam ultrasonic welding using the highly efficient piezo-ceramic transducers to estimate weldability of lamsan, nylon and polypropylene fabrics. Comparative productivity analysis was performed in ultrasonic welding of the synthetic fabrics using the piezo-ceramic and nickel transducers. Main parameters of modes in the ultrasonic welding of fabrics for the piezo-ceramic transducers were determined. It is shown that

parameters of the mode in ultrasonic welding of the synthetic fabrics significantly affect the rate of reaching maximum temperatures in the welded joint zone and determine the heating intensity and, consequently, the welding productivity.

Keywords: synthetic fabrics, ultrasonic welding, piezo-ceramic transducer, waveguide oscillation amplitude, frequency auto-tuning, acoustic load, welding rate

Успешное применение синтетических тканей (СТ) в промышленности и быту обусловлено высокими физико-механическими показателями, минимальным водопоглощением, стойкостью к воздействию агрессивных сред и повышению температур, износоустойчивостью и другими свойствами СТ. Благодаря им СТ успешно конкурируют с натуральными тканями.

По химическому строению составляющих волокон наиболее распространенные СТ подразделяют на следующие группы: полиамидные (капрон, анид), полиэфирные (лавсан), полиакрилонитрильные (нитрон), поливинилхлоридные (хлорин) и полипропиленовые [1, 2].

СТ широко используют для изготовления белья и изделий бытового назначения, тяжелых морских канатов, рыболовных сетей, клиновидных и ленточных ремней, спецодежды, пожарных шлангов, тканей для нужд медицины, а также в химической, горнодобывающей, нефтеперерабатывающей промышленности и цветной металлургии [1, 2].

До недавнего времени СТ соединяли нитками на швейных машинах. Однако такой способ имеет существенные недостатки. В связи с этим все большее распространение получают безниточные способы соединения СТ, такие как термомонтажная, высокочастотная и ультразвуковая сварка (УЗС). Наиболее перспективным из этих способов является УЗС [3–5].

Для УЗС СТ разработано специальное оборудование. Как правило, это стационарные ультразвуковые установки с электромеханическими преобразователями из магнитострикционных металлических материалов (никеля или пермендюра), охлаждаемых в процессе работы водой и электрическими генераторами мощностью 1 кВт и более.

Такие установки обеспечивают достаточную прочность сварных соединений и высокую производительность. Однако в ряде случаев высокая стоимость, значительные габаритные размеры и большая мощность, потребляемая такими установками, снижают эффективность ультразвукового способа соединения СТ и возможность его применения в производственных условиях.

В связи с этим наряду с мощными стационарными установками необходимы малогабаритные высокоэффективные устройства с преобразователями из пьезоэлектрических материалов. Такие устройства, в частности, можно использовать в виде ручного сварочного инструмента, так называемых пистолетов [6, 7].

В последние годы успешно проводились исследования по применению высокооборотных ультразвуковых колебательных сварочных систем с пьезокерамическими преобразователями (ПКП) для сварки СТ [7, 8].

Ультразвуковые сварочные установки (машины) обычно содержат следующие основные элементы: сварочный узел (акустический узел, сварочная головка), опору, механизм давления (механизм передвижения подвижных элементов), вспомогательные устройства, блок управления и станину (корпус).

Важнейшим узлом, составляющим основу и заключающим в себе специфику оборудования и технологии УЗС пластмасс, является электромеханическая колебательная система (сварочный узел). Эта система служит для преобразования электрических колебаний ультразвуковой частоты, вырабатываемых ультразвуковым генератором (УЗГ), в механические колебания той же частоты.

Кроме того, она выполняет функции передачи этой энергии в зону сварки, согласования сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением системы и геометрических размеров зоны ввода энергии с размерами преобразователя — излучателя.

Сварочный узел обеспечивает необходимую колебательную скорость на рабочем торце волновода-инструмента (далее волновод) при максимальном коэффициенте полезного действия (КПД) на резонансной частоте независимо от изменения сопротивления нагрузки. Сварочный узел включает в себя преобразователь энергии, который может быть как магнитострикционным, так и пьезокерамическим [4, 7, 8].

Цель исследования — разработка высокоэффективных колебательных систем, позволяющих получать высококачественные сварные соединения при УЗС СТ.

На кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана спроектирована и изготовлена ультразвуковая машина УПШ-12 (рис. 1) для сварки СТ из лавсанового, полипропиленового и капронового волокон толщиной 100...1000 мкм с использованием в акустических системах сварочных узлов высокоэффективных ПКП [4, 8, 9].

Особенность сварочной машины УПШ-12 заключается в том, что для повышения прочности соединения за волноводом 3 установлен прокатывающий ролик 6, закрепленный на кронштейне станины 10. Так как СТ имеют большую теплоемкость и малый коэффициент теплоотдачи, сварной шов подходит к ролику 6 еще не остывшим, поэтому прокатка происходит при повышенной температуре.

В результате прокатки прочность сварного соединения становится больше на 4...7 %, чем у шва, полученного без прокатки. Предусмотрено регулирование положения прокатывающего ролика в зависимости от толщины свариваемой СТ, что позволяет ее прокатывать при УЗС с различной силой прижима. Установочный винт 9 служит для регулирования до 5 мм зазора между торцом волновода и опорой-роликом 2.

Сварочную машину УПШ-12 применяют для сварки фильтровальных «рубашек» из СТ с длиной швов 2,5 м на горно-обогажительных фабриках. Она обеспечивает достаточную производительность и прочность сварного соединения.

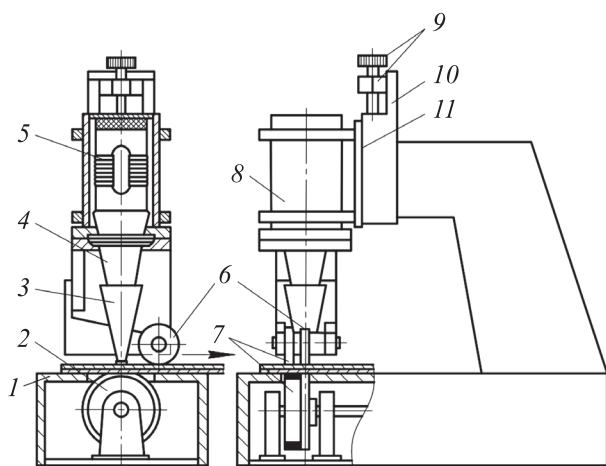


Рис. 1. Схема сварочной машины УПШ-12:

1 — рабочий стол; 2 — опора-ролик; 3 — волновод; 4 — трансформатор упругих колебаний; 5 и 8 — ПКП и его ограждение; 6 и 7 — прокатывающий и протягивающие ролики; 9 — установочный винт и гайка; 10 — станина; 11 — подвижная панель

В состав сварочной машины УПШ-12 входит ПКП 5 мощностью 0,4 кВт и частотой 22 кГц. В качестве источника питания ПКП (сварочного узла) использован модернизированный серийно выпускаемый фирмой «Ультразвуковая техника ИНЛАБ» (г. Санкт-Петербург) УЗГ ИЛ10-0,4 массой 6,2 кг с расширенным диапазоном частоты 20...70 кГц и габаритными размерами 115×150×60 мм.

УЗГ оснащен системой плавного регулирования мощности до 1,5 кВт, цифровым частотомером, аналоговым индикатором резонанса акустической системы, фазовой автоподстройкой частоты и источником поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение УЗГ — воздушное, принудительное. Частоту ультразвуковых колебаний контролирует цифровой частотомер. Для измерения амплитуды колебаний волноводов разработаны датчики [4–6].

Высокая эффективность сварочной машины УПШ-12 обусловлена в первую очередь добротностью ультразвуковой пьезокерамической колебательной системы и малыми собственными потерями.

Результаты исследования высокочастотных колебательных систем, применяемых для сварки СТ, позволили определить оптимальные режимы ее работы. Исследованы ультразвуковые ПКП типа «сэндвич» [7–9].

Пьезокерамические преобразователи изготавливают из кристаллов кварца, сегнетовой соли, турмалина, керамики титаната бария ($BaTiO_3$), цирконата-титаната свинца [$Pb(ZrTi)O_3$] и его производных. По сравнению с другими пьезокерамическими материалами цирконат-титанат свинца обладает большим пьезомодулем (величиной, аналогичной модулю магнитострикционной активности), высокой точкой Кюри (что позволяет ему устойчиво работать при температуре до 130 °С с акустической мощностью излучения 50...100 кВт/м²) и значительной механической прочностью [6, 9, 10]. Пьезоактивные элементы преобразователя выполняют в виде круглых или прямоугольных пластин.

ПКП типа «сэндвич» (рис. 2) состоит из двух пьезокерамических шайб 5 размером 38×16×5 мм, размещенных между двумя частотопонижающими накладками. Вся система стянута центральным болтом. Пассивная накладка 4 изготовлена из стали 12Х18Н10Т, активная 6 — из алюминиевого сплава Д16. Последняя посредством резьбового соединения связана с транс-

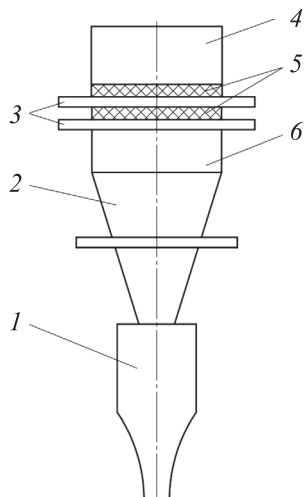


Рис. 2. Схема ПКП типа «сэндвич»

форматором упругих колебаний 2, имеющим диафрагму для крепления акустической системы на кронштейне сварочной машины и резьбу на торце для соединения с волноводом 1.

Трансформатор и волновод выполнены из титанового сплава ВТ5. Между пьезокерамическими шайбами установлены алюминиевые токоподводящие диски 3, которые служат радиаторами. Чтобы уменьшить акустический импеданс, все сопрягаемые детали и пьезокерамические шайбы притирали на чугунной плите с применением алмазных паст. Основная резонансная частота системы обычно колеблется в пределах ± 250 Гц, что зависит от точности изготовления ее элементов, свойств применяемых материалов и отклонения электрофизических параметров пьезокерамики.

Основные достоинства такого пакетного преобразователя — простота конструкции, отсутствие необходимости в высоком напряжении поляризации и сравнительно малый объем пьезоактивного материала. Максимальный КПД при достижении одной и той же акустической мощности излучения у пьезокерамических преобразователей больше, чем у магнитострикционных металлических, а система охлаждения гораздо экономичнее или вовсе не требуется.

Недостатки указанной конструкции ПКП связаны в основном с размещением пьезоэлемента в зоне максимальных амплитуд механического напряжения, т. е. наибольших потерь [9, 10].

Основным фактором, характеризующим прочность соединения, является количество энергии, вводимой в свариваемый материал в процессе УЗС [11]. Количество энергии опреде-

ляется сочетанием основных параметров режима УЗС и, вероятно, не зависит от схемы сварки. Это позволяет предположить, что если при шовной УЗС создать условия, идентичные получению соединения наибольшей прочности при прессовой сварке, то и при УЗС СТ можно получить соединения, обладающие максимальной прочностью [5, 11].

Методы расчета скорости шовной УЗС нуждаются в экспериментальном исследовании, так как она существенно отличается от прессовой [12]. В случае прессовой УЗС сварные соединения образуются при неподвижном материале, при шовной УЗС — при постоянном и равномерном перемещении материала под волноводом.

В связи с этим возникла необходимость исследования и разработки высокооборотных ультразвуковых колебательных систем небольшой мощности с применением ПКП для УЗС СТ, а также проведения сравнительного анализа их с никелевыми магнитострикционными преобразователями [3, 6].

Оптимальными параметрами режима шовной УЗС СТ являются: амплитуда колебаний рабочего торца волновода A , мкм; частота колебаний f , кГц; скорость сварки v , м/с; статическое сварочное давление $p_{ст}$, МПа, или усилие прижима волновода к материалу F , Н. Эти параметры определяли в процессе шовной УЗС капроновой, лавсановой и полипропиленовой тканей толщиной 500 мкм.

В качестве параметра оптимизации использовали прочность сварного соединения на расслаивание, оцениваемую разрывной силой Q , отнесенной к 1 см шва. При исследовании влияния одного из параметров режима сварки на прочность соединения значения двух параметров поддерживали постоянными [4, 5, 13].

Наилучшие значения параметров уточняли путем последовательного изменения каждого из них как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Варьировали одно значение, в то время как остальные параметры оставались неизменными. Пределы изменения параметров определялись значениями, при которых выявлялся максимум прочности свариваемых СТ.

Последовательность выбора параметров для определения наилучшего режима сварки может быть разной. Частота ультразвуковых колебаний зависит от используемого УЗГ и, как правило, остается неизменной (22 кГц). Постоянные параметры, в каждом случае подобранные

методом последовательного приближения, близки к оптимальным. Например, оптимальная амплитуда колебаний $A_{\text{опт}}$ составляла 30...40 мкм. Примерно в таких пределах лежат и значения оптимальных амплитуд для мощных магнитострикционных преобразователей.

У разных СТ оптимальные амплитуды колебаний волновода различаются вследствие неодинаковой температуры плавления $T_{\text{пл}}$. У полипропиленовой ткани $T_{\text{пл}} = 165$ °С, у капроновой — $T_{\text{пл}} = 215$ °С, у лавсановой — $T_{\text{пл}} = 260$ °С [10, 11]. Оптимальные значения сварочного усилия $F_{\text{опт}}$ для различных материалов примерно одинаковые (около 100 Н). В мощных магнитострикционных преобразователях оптимальное сварочное усилие составляет 200...250 Н в зависимости от вида свариваемой СТ.

Повышенное значение оптимального усилия добротного маломощного ПКП можно объяснить заметным снижением амплитуды колебаний волновода при $F > 100$ Н. Для ее поддержания на прежнем уровне при больших усилиях потребовалось бы повысить в несколько раз напряжение, питающее ПКП, и подводимую к ней электрическую мощность [5, 6, 14].

На сварочной машине УПШ-12 усилие прижима $F = 80$ Н создается путем зазора между волноводом и опорой, равного примерно половине суммарной толщины свариваемых СТ. Оптимальная скорость сварки $v_{\text{опт}}$ невелика (около 20 м/ч) для всех материалов, в то время как на мощных сварочных машинах она доходит до 50 и даже 100 м/ч.

Увеличение оптимальной скорости сварки обычно достигается повышением усилия прижима F . Однако, как уже указывалось, для высокочастотных колебательных систем увеличение F ведет к резкому снижению амплитуды колебаний волновода. Это связано с тем, что с ростом усилия прижима возрастает сопротивление акустической нагрузки $r_{\text{ак}}$, которая ввиду малого сопротивления собственных потерь таких систем начинает сильно сказываться на режиме работы.

В связи с этим представляет интерес количественная оценка $r_{\text{ак}}$ и ее сравнение с сопротивлением механических и электрических потерь ПКП [15]. Определение сопротивления нагрузки в процессе УЗС имеет существенное значение, так как, зная $r_{\text{ак}}$, можно установить вводимую в нагрузку мощность и вычислить КПД акустической системы.

В научно-технической литературе данные о значениях акустического сопротивления при УЗС отсутствуют. Расчет этой величины сильно затруднен, так как из-за малой контактной свариваемой площади форма излучаемой волны сильно отличается от плоской, материал под волноводом меняет свойства в процессе сварки, акустический контакт между волноводом и СТ, тканью и опорой, между свариваемыми слоями СТ — неопределенный и непостоянный.

В настоящее время сопротивление акустической нагрузки можно определить лишь экспериментальным путем, причем наиболее целесообразно использовать для этого изменение электрического импеданса акустической колебательной системы под действием нагрузки [8, 13].

Схема измерения сопротивления акустической нагрузки при УЗС СТ приведена на рис. 3. В качестве источника питания ПКП выступал УЗГ ИЛ10-0,4 с высокоомным выходом, на пластинах — шайбах ПКП поддерживался режим постоянного тока. Настройку на частоту механического резонанса ПКП f_0 , соответствующего минимуму ее электрического импеданса, проводили по минимуму напряжения, измеряемого вольтметром, а значение f_0 замеряли электронным частотомером.

На частоте $f_0 = 22$ кГц фиксировали значения следующих параметров: напряжения на пластинах U , силу тока в них I , потребляемую электрическую мощность W (посредством электронного ваттметра) и амплитуду колебаний волновода A (с помощью микроскопа). Одновременно осциллографом контролировали форму напряжения на пластинах и температуру всего ПКП. Температуру измеряли расположенной под пластинами термопарой [10, 11].

Измерения проводили при сварке двух тканей — капроновой и лавсановой толщиной 700 и 600 мкм соответственно.

Для сравнения по описанной схеме также измеряли параметры мощного никелевого магнитострикционного преобразователя, охлаждаемого водой, при работе без нагрузки. Указанный преобразователь с резонансной частотой 22 кГц изготавливали из пластин никеля толщиной 0,1 мм с обмоткой медной проволоки из двадцати пяти витков. Волновод был таким же, как у ПКП.

Результаты измерений — акустические характеристики преобразователей — приведены в табл. 1, где D — механическая добротность пре-

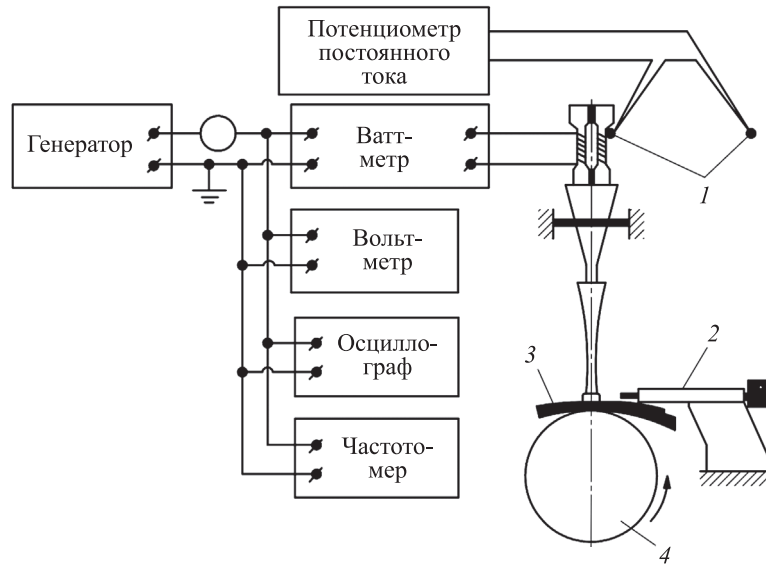


Рис. 3. Схема измерения сопротивления акустической нагрузки при УЗС СТ:
1 — термопара; 2 — микроскоп; 3 — свариваемая ткань; 4 — прижимной ролик

Таблица 1

Акустические характеристики преобразователей

Тип преобразователя	f_0 , кГц	U , В	I , А	W , Вт	A , мкм	D	$W_{э.п}$, Вт	W_m , Вт
Пьезокерамический	22	50	1,5	400	35	400	3,25	21,75
Никелевый	22	22	3,1	400	35	85	25,00	90,00

образователя, вычисленная по частотным характеристикам амплитуды колебаний волновода или потребляемой электрической мощности W ; $W_{э.п}$ — мощность электрических потерь, определенная по измеренным значениям мощности ниже и выше резонанса; W_m — механическая мощность, $W_m = W - W_{э.п}$.

Как следует из табл. 1, при одинаковой амплитуде колебаний волновода A никелевый преобразователь потребляет намного больше мощности, чем ПКП. Это зависит от добротности и мощности электрических потерь ПКП.

Характерно, что для сохранения при УЗС амплитуды колебаний волновода у ПКП в 2 раза увеличивается напряжение питания, что свидетельствует о значительной роли активной компоненты сопротивления нагрузки. Реактивная компонента нагрузки имела характер дополнительной массы и вызвала изменения частоты на 0,1 %, т. е. примерно на половину ширины полосы колебательной системы [14, 15].

По экспериментальным данным вычислены параметры эквивалентной схемы ультразвукового преобразователя (рис. 4). При вычислениях использовали значение сдвига фаз между напряжением и током двигателя (коэффициента мощности) $\cos \varphi$, определенное по величи-

нам I и W , а также условие равенства нулю реактивной компоненты в «механической» ветви схемы на резонансной частоте 22 кГц.

Значения индуктивности обмотки L_e преобразователя и сопротивление ее электрических потерь R_e на резонансной частоте определяли как $W_{э.п}$. Значение эквивалентного электрического сопротивления механических потерь $R_{м.п}$ равнялось активному сопротивлению в «механической» ветви при работе без нагрузки, а значение эквивалентного электрического сопротивления акустической нагрузки $R_{ак}$ — разности между эквивалентным механическим сопротивлением при УЗС и $R_{м.п}$.

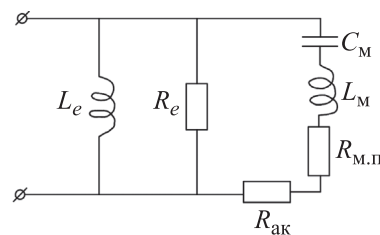


Рис. 4. Эквивалентная схема ультразвукового преобразователя:
 L_m и C_m — эквивалентная эффективная масса колебательной системы и ее эквивалентная податливость

Таблица 2

Параметры эквивалентных схем преобразователей и КПД

Преобразователь	R_{ϵ} , Ом	$R_{м.п}$, Ом	$R_{ак}$, Ом	$\eta_{\epsilon.м}$, %	$\eta_{м.а}$, %	$\eta_{\epsilon.а}$, %
Пьезокерамический	190	9,5	19	85	65	55
Никелевый	96	30,0	11	70	25	17,5

Параметры эквивалентных схем преобразователей и определенные по ним электромеханический $\eta_{\epsilon.м}$, механоакустический $\eta_{м.а}$ и электроакустический $\eta_{\epsilon.а}$ КПД приведены в табл. 2.

Как следует из табл. 2, эффективность акустической системы с ПКП значительно больше, чем у таковой с никелевым преобразователем. Следует отметить различие в соотношении сопротивлений $R_{ак}$ и $R_{м.п}$ для двух преобразователей. У высокодобротного ПКП небольшое по абсолютному значению сопротивление нагрузки в 2 раза превышает сопротивление механических потерь, что обуславливает относительно высокий КПД акустической системы.

Однако по этой же причине нагрузка сильно влияет на режим работы ПКП, вызывая уменьшение амплитуды колебаний волновода. У акустической системы с никелевым преобразователем сопротивление нагрузки составляет лишь часть от сопротивления потерь, вследствие чего значительно меньше сказывается на значении амплитуды. В мощных установках собственные потери преобразователей еще больше, поэтому и при повышенных (по сравнению с рассматриваемым случаем) сварочных усилиях нагрузка мало влияет на режим их колебаний [5, 7, 12].

По измеренным величинам W и $\eta_{\epsilon.а}$ (или по A , f_0 и $r_{ак}$) вычисляли вводимую при УЗС мощность. Результаты исследований показали, что малые собственные механические потери колебательных систем, обуславливающие высокую экономичность ультразвуковых сварочных машин с добротными ПКП, упрощение их конструкции, уменьшение габаритных размеров, массы и исключение водяного охлаждения, определяют и некоторые недостатки таких машин: снижение амплитуды волновода под нагрузкой, ограничивающее производительность процесса, и выход акустической системы из резонанса.

Однако эти недостатки не являются принципиальными и могут быть преодолены применением соответствующих генераторных схем.

Чтобы исключить влияние изменений резонансной частоты под нагрузкой, необходима автоматическая подстройка частоты УЗГ на резонанс акустической системы [7, 8, 13].

Известны различные схемы с автоподстройкой частоты, и их широко применяют в ультразвуковой технике. В частности, схема автоподстройки частоты реализована в генераторе ИЛ10-0,4. Как уже указывалось, он имеет фазовую автоподстройку частоты и источник поляризации с выходным током до 30 А. Выходная частота может быть изменена в любую сторону от 16 до 25 кГц. КПД УЗГ составляет 92 % при нагрузке с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,86$.

УЗГ используют в составе акустических систем для возбуждения магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей. Снижение амплитуды колебаний волновода можно скомпенсировать повышением напряжения, питающего преобразователь, так как режим его работы при сварке СТ далек от предельного, при котором сказывается нелинейность его свойств.

Но при этом необходима автоматическая подстройка частоты на заданную амплитуду колебаний волновода, потому что с увеличением частоты амплитуда колебаний волновода при работе без нагрузки может превысить пределы, определяемые прочностью керамики, из которой изготовлен преобразователь.

Выводы

1. Установлено, что высокая эффективность высокодобротных ультразвуковых колебательных систем с ПКП обусловлена их добротностью и малыми собственными потерями.

2. Исследована свариваемость лавсановой, капроновой и полипропиленовой тканей толщиной 400...700 мкм. Определены режимы сварки, которые довольно близки друг к другу при одинаковых толщине материалов, схеме УЗС и типе сварочного преобразователя.

Литература

- [1] Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва, Научный мир, 2007. 576 с.
- [2] Крыжановский В.К., ред. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [3] Комаров Г.В. *Способы соединений деталей из пластических масс*. Москва, Химия, 2007. 288 с.
- [4] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [5] Волков С.С. Распределение мощности в ультразвуковой сварочной системе при сварке полимерных пленок. *Сварочное производство*, 2012, № 10, с. 42–46.
- [6] Волков С.С. Энергетические показатели работы акустического узла при ультразвуковой сварке. *Сварка и диагностика*, 2012, № 6, с. 40–44.
- [7] Волков С.С., Неровный В.М., Ремизов А.Л. Влияние акустической мощности сварочного узла на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке. *Сварка и диагностика*, 2017, № 5, с. 25–29.
- [8] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>
- [9] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [10] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [11] Волков С.С., Шестель Л.А., Соколов В.А. Разработка процесса ультразвуковой сварки изделий из полиэтилентерефталатных пленок. *Сварка и диагностика*, 2013, № 2, с. 58–62.
- [12] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [13] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 2, pp. 163–166, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695551>
- [14] Volkov S.S. Effect of fillers and dyes on weldability and service properties of ultrasound-welded joints in plastics. *Weld. Int.*, 2010, vol. 24, no. 9, pp. 734–737, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.486179>
- [15] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Weld. Int.*, 2008, vol. 22, no. 3, pp. 193–197, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802065561>

References

- [1] Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Polymer physics and chemistry]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2007. 576 p. (In Russ.).
- [2] Kryzhanovskiy V.K., ed. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Petersburg, Professiya Publ., 2005. 235 p. (In Russ.).
- [3] Komarov G.V. *Sposoby soedineniy detaley iz plasticheskikh mass* [Methods of connecting parts made of plastic masses]. Moscow, Khimiya Publ., 2007. 288 p. (In Russ.).
- [4] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding polymeric materials]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [5] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 10, pp. 42–46. (In Russ.). (Eng. version: *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>)
- [6] Volkov S.S. Energy performance of the acoustic unit during ultrasonic welding. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2012, no. 6, pp. 40–44. (In Russ.).
- [7] Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Remizov A.L. Influence of the acoustic power of the welding unit on the weldability of plastics during ultrasonic welding. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2017, no. 5, pp. 25–29. (In Russ.).
- [8] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>

- [9] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [10] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Petersburg, Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [11] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Development of the process of ultrasonic welding of products from polyethylene terephthalate films. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2013, no. 2, pp. 58–62. (In Russ.).
- [12] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [13] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 2, pp. 163–166, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695551>
- [14] Volkov S.S. Effect of fillers and dyes on weldability and service properties of ultrasound-welded joints in plastics. *Weld. Int.*, 2010, vol. 24, no. 9, pp. 734–737, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.486179>
- [15] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Weld. Int.*, 2008, vol. 22, no. 3, pp. 193–197, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802065561>

Статья поступила в редакцию 29.04.2023

Информация об авторах

ВОЛКОВ Станислав Степанович — кандидат технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: map@bmstu.ru).

НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

КОБЕРНИК Николай Владимирович — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: koberniknv@bmstu.ru).

МИКАЙИЛОВА Юлия Александровна — ассистент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mikaiilova@bmstu.ru).

Information about the authors

VOLKOV Stanislav Stepanovich — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

NEROVNIY Vyacheslav Michailovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

KOBERNIK Nikolay Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Head of Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: koberniknv@bmstu.ru).

MIKAYILOVA Julyia Alexandrovna — Assistant, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mikaiilova@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Неровный В.М., Коберник Н.В., Микайилова Ю.А. Применение пьезокерамических преобразователей для ультразвуковой сварки синтетических тканей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 52–60, doi: [10.18698/0536-1044-2023-9-52-60](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-9-52-60)

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Nerovniy V.M., Kobernik N.V., Mikayilova J.A. Piezo-ceramic transducer introduction in the synthetic fabrics ultrasonic welding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 52–60, doi: [10.18698/0536-1044-2023-9-52-60](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-9-52-60)