Ультразвуковая сварка полимерных пленок Ultrasonic welding of polymer films

С.С. ВОЛКОВ, В.М. НЕРОВНЫЙ, Г.А. БИГУС

S.S. VOLKOV, V.M. NEROVNY, G.A. BIGUS

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва, Россия

Bauman Moscow State Technical University

bauman@bmstu.ru

Обоснован выбор способа ультразвуковой сварки полимерных пленок, отмечены его преимущества перед другими способами сварки.

Показано, что параметрами, определяющими производительность процесса ультразвуковой шовной сварки полимерных пленок, служат амплитуда колебаний волновода, сварочное статическое давление и скорость сварки с фиксированным зазором на вращающемся ролике-опоре с автостабилизацией толщины сварного шва.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, полимерные пленки, сварочное статическое давление, фиксированный зазор, волновод-инструмент, амплитуда колебаний волновода.

The choice of the method of ultrasonic welding of polymer films is substantiated, its advantages over other welding methods are noted.

It is shown that the parameters determining the performance of seam ultrasonic welding process for polymer films are the amplitude of the waveguide oscillations, the welding static pressure and the speed of welding with a fixed gap on a rotating support roller with self-stabilization of the welding seam thickness.

Keywords: ultrasonic welding, polymeric films, welding static pressure, the fixed gap, a wave guide tool, amplitude of fluctuations of a wave guide.

DOI: 10.35164/0554-2901-2019-11-12-59-62

В настоящее время разработано и выпускается большое количество полимерных пленочных материалов с самыми разнообразными сочетаниями физико-механических, термических, химических и реологических свойств [1, 2]. Разнообразие свойств полимерных пленочных материалов позволило применять их для укупорки различных пищевых и других продуктов. В связи с этим возникла необходимость создания прочного, герметичного, неразъемного соединения полимерных материалов. Существуют несколько методов получения такого соединения. Одним из них является сварка, получившая широкое распространение [3, 4].

Выбор способа сварки зависит от толщины материала, свойств полимерных материалов, серийности выпуска изделий, типа конструкции и предъявляемых к ней требований, а также условий, в которых происходит процесс сварки. Для соединения ряда полимерных пленочных материалов эффективно использование ультразвуковой сварки. Результаты исследований, проведенных за последние годы на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана по разработке метода ультразвуковой сварки полимерных материалов, показали преимущества этого способа перед другими (сваркой нагретым газом, нагретым инструментом, расплавом, экструзией, токами высокой частоты, инфракрасным излучением, световым лучом), а также выявили области его применения в промышленности [4].

Однако в случае сварки по загрязненным поверхностям все указанные методы сварки, кроме ультразвуковой, не обеспечивают получения качественного соединения и надежной герметизации упаковываемого продукта. Возможность ультразвуковой сварки по загрязненным поверхностям обусловлена тем, что загрязнения под действием ультразвуковых колебаний устраниваются из сварочной зоны. Вероятно, удалению загрязнений способствуют поперечные волны, распространяющиеся от зоны сварки [4, 5].

С помощью ультразвука можно выполнять сварку изделий, поверхности которых покрыты растворами солей, пищевых кислот, масла и т.д. При этом нагреву подвергают только ту незначительную по глубине и ширине часть внутренней поверхности соединяемых полимерных материалов, которая предназначена для сварки, что очень важно при сварке тары с пищевыми продуктами, а также с различными горючими веществами, так как исключается воз-

можность разогрева продукта, помещенного в полимерную тару. Поверхность деталей не подвергается предварительной обработке. В отличие от сварки токами высокой частоты, при ультразвуковой сварке не требуется значительного диэлектрического коэффициента потерь у свариваемых материалов. Достаточная абсорбционная способность, которой обладают почти все термопластичные полимерные материалы, позволяет соединять их ультразвуком [4, 5].

Определяющими параметрами процесса ультразвуковой сварки полимерных пленок являются: амплитуда смещения инструмента-волновода, определяющая при заданной постоянной частоте энергию вводимых в материал колебаний; сила прижатия волновода-инструмента к материалу (сварочное статическое давление); скорость перемещения свариваемого материала под волноводом-инструментом или время пропускания ультразвукового импульса; зазор, установленный между рабочим торцом волновода-инструмента и опорой, на которой располагается свариваемый материал; материал и форма рабочего торца волновода-инструмента; частота ультразвуковых колебаний f (кГц).

При сварке полимерных пленок особое внимание следует обращать на геометрические размеры, материал и форму заточки рабочего торца волновода-инструмента. Оптимальная форма заточки рабочего торца волновода приведена на рис. 1.

Оптимальной является заточка типа «отвертки» с радиусом закругления около 1 мм. При большем радиусе требуется большое усилие прижима для создания необходимого статического давления на свариваемые пленки. Сварку можно выполнять как широкой гранью при перемещении материала в направлении a (см. рис. 1), так и узкой — при перемещении материала в направлении b . В последнем случае скорость процесса несколько выше, однако больше вероятность образования подрезов материала в околошовной зоне сварного шва.

В первом случае свариваемость в значительной степени зависит от радиуса закругления конца волновода-инструмента. В работе нами предложена сферическая заточка торца волновода.

Такая форма заточки позволяет производить сварку с наименьшим ослаблением околошовной зоны и более равномерно передавать усилие прижатия на свариваемые поверхности пленочного материала.

Рис. 1. Форма заточки рабочего торца волновода-инструмента.

Применение сферической заточки позволило повысить прочность сварных соединений из полимерных пленок.

Для получения протяженных сварных швов на полимерных пленочных материалах необходимо относительное перемещение волновода и свариваемого изделия. При этом перемещение материала может вызвать повреждение разогретой пленки волноводом, со стороны которого прикладывается давление. Поэтому при соединении полимерных пленок получили дальнейшее развитие следующие способы ультразвуковой сварки [3, 4].

Шовно-шаговая сварка. Используется шаговая подача материала с перекрытием в местах стыка с помощью волновода ножевого типа (рис. 2). Способ заключается в периодическом продвижении материала под инструментом на шаг сварки. В момент движения материала давление снимается. Шовно-шаговая сварка целесообразна для соединения полимеров толщиной 0,5–2,0 мм.

Рис. 2. Схема шовно-шаговой сварки: 1 – свариваемые пленки; 2 – сварной шов, 3 – волновод.

Сварка с фиксированным зазором с ограничением остаточной толщины шва. Контакт волновода с материалом практически нарушается, как только толщина материала в зоне сварки становится равной установленной величине зазора между рабочим торцом волновода и опорой (рис. 3). Величину зазора определяют экспериментально и устанавливают с помощью микрометрического винта. Такой способ ограничения воздействия колебаний волновода на полимер позволяет получать непрерывный сварной шов на ряде пленочных материалов (полиэтилентерефталате, полиамидной пленке и др.) без повреждения поверхности изделия. Однако при соединении пленок с разнотолщинностью в исходном состоянии использование сварки с фиксированным зазором может привести к появлению брака (прожога или несплавления).

Рис. 3. Схема сварки ультразвуком протяженных швов с установкой необходимого зазора между рабочим торцом волновода и опорой: 1 – магнитоstrictionный преобразователь, 2 – волновод-инструмент, 3 – свариваемые пленки, 4 – опора, 5 – микрометрический винт для ограничения зазора.

Сварка на вращающемся ролике-опоре. Применяют два вида: сварку на ролике с фиксированным зазором, аналогичную описанному выше способу (остаточная толщина шва определяется величиной устанавливаемого зазора между торцом волновода и поверхностью ролика-опоры), и сварку на ролике с автостабилизацией толщины сварного шва.

Волновод в течение всего сварочного цикла поджат к изделию с постоянным усилием $P_{ст}$. Остаточная толщина шва $h_{ш}$ определяется соотношением между выделяющейся в полимере при прохождении ультразвуковых колебаний теплотой и теплопередачей от нагретой массы полимера к более холодным — опоре и волноводу.

По степени механизации непрерывная сварка делится на ручную и механизированную. В первом случае для получения непрерывных швов любой протяженности оператор вручную перемещает сварочную головку, а изделие остается неподвижным. При этом за счет клиновидной заточки и незначительной толщины свариваемых материалов инструмент контактирует с небольшим объемом полимера [1, 2].

Таким образом можно соединять многослойные пакеты из полиэтилентерефталатной пленки, а также полипропиленовые и полиамидные пленки типа ПК-4, имеющие металлизированное, фотоэмульсионное или ферролаковое покрытие (без предварительного удаления последнего) и т.п. Такую разновидность сварки называют также сваркой скользящим инструментом [4]. Ручная сварка полиэтиленовых пленок затруднена из-за периодического налипания размягченного полимера на волновод-инструмент, что в конечном счете приводит к прожогам свариваемого материала. Для устранения этого недостатка можно применять при сварке технологические прокладки из полимерных материалов (фторопласт и др.), металлической фольги, чертежной кальки и др. Ручную сварку можно использовать для соединения в труднодоступных местах, а также для прихватки деталей перед механизированной сваркой. В последнее время ручные ультразвуковые пистолеты нашли применение для сварки, наплавки и резки костных и других биологических тканей [3].

Механизированная непрерывная сварка, как правило, осуществляется при перемещении свариваемого изделия, а сварочный волновод остается неподвижным. В зависимости от способа перемещения свариваемого материала механизированная сварка делится на шовно-шаговую и шовную.

Шовно-шаговая сварка обеспечивает небольшую производительность процесса, поэтому основное внимание уделяется исследованию шовной сварки на протяг и на вращающемся ролике. При этом, как правило, сварка выполняется с фиксированным зазором [4]. Однако в случае сварки пленок, имеющих в исходном состоянии разнотолщинность, с чем довольно часто приходится сталкиваться на практике, сварка по последней схеме приводит к появлению брака. Это объясняется тем, что в местах, где суммарная толщина пленок оказывается меньше номинальной толщины, исходя из которой был установлен зазор между рабочим торцом волновода и опорой, образуется несплав, а в местах с большей толщиной — прожог свариваемой пленки. Поэтому наиболее перспективной следует считать шовную сварку на вращающемся ролике с фиксированным зазором или с автостабилизацией толщины сварного шва.

Необходимость герметично укупоривать в емкости из полимерных пленок различные пищевые продукты, а также детали технического назначения, потребовала разработки универсального и высокопроизводительного сварочного оборудования.

Сложность задачи состоит в том, что герметизирующий шов необходимо выполнять тогда, когда полиэтиленовая емкость (мешок) уже наполнена различными продуктами, и свариваемые поверхности часто оказываются покрытыми различными веществами [5].

В некоторых упаковочных машинах (линиях) используется метод шовной ультразвуковой сварки. При разработке высокопроизводительных машин, работающих по принципу непрерывного перемещения вертикально стоящих упаковок, например, крафт-мешков с полиэтиленовыми вкладышами, заполненных сухим молоком, мукой и т.п., необходимо увеличивать линейную скорость сварки, обеспечивать ультразвуковым сварочным устройством [3, 4].

На кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана была выполнена работа по исследованию некоторых вопросов ультразвуковой шовной сварки полимерных пленок. В результате была спроектирована и изготовлена ультразвуковая сварочная машина модели УПШ-19 для сварки полимерных пленок.

Машина предназначена для шовной ультразвуковой сварки дублированных пленочных материалов типа полиэтилен-целлофан (ПЦ-2) и полиэтилен-лавсан толщиной 70–150 мкм. В машине используется схема автостабилизации толщины сварного шва. Сварка пленок производится по загрязненным поверхностям. Машина позволяет сваривать швы любой протяженности. Мощность электродвигателя 0,2 кВт. Машина УПШ-19 применяется для сварки рукавов, мешков и пакетов при упаковке пищевых продуктов.

Электрокинематическая схема машины УПС-19 приведена на рис. 4. Двигатель 3 передает вращение ролику-опоре 2 и тянущим роликам 4. Свариваемая пленка движется между волноводом 1 и роликом-опорой 2 под действием сил сцепления с последним.

Рис. 4. Электрокинематическая схема установки УПС-19:
1 – волновод-инструмент;
2 – вращающийся ролик-опора;
3 – электродвигатель с регулируемой скоростью вращения;
4 – тянущие ролики.

Тянущие ролики 4 предназначены для стабилизации скорости сварки. Для наблюдения за процессом опорный вращающийся ролик выполнен в виде датчика. Материал ролика — пьезокерамика ЦТС-19. При деформации опорного ролика с частотой ультразвуковых колебаний на металлизированных обкладках ролика возникает Э.Д.С., замеряемая индикатором И. Величина сигнала датчика-опоры является функцией толщины полимера и его температуры. При нарушении процесса сварки величина сигнала меняется. С помощью переменного сопротивления R оператор имеет возможность подобрать скорость сварки, соответствующую оптимальному режиму, ориентируясь на показания индикатора И.

Наличие датчика в виде ролика-опоры кроме слежения за процессом сварки позволяет заранее определять оптимальную скорость сварки пленочных полимерных материалов [6, 7].

Сварочный узел включает в себя магнитострикционный преобразователь мощностью 0,4 кВт, с частотой колебаний 22 кГц, работающий от ультразвукового генератора ИЛ10-0,4; трансформатор упругих колебаний, являющийся согласующим акустическим звеном между волноводом и преобразователем; и волновод-инструмент, через рабочий торец которого ультразвуковые колебания вводятся в свариваемые изделия [6, 7].

Ультразвуковой генератор, разработанный фирмой «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ» (Санкт-Петербург) совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана, изготавливают с выходной мощностью 400 Вт на полевых транзисторах и с возможностью оперативного регулирования всех рабочих параметров. В данной работе применяли генератор ИЛ 10-0,4 мощностью 400 Вт, оснащенный ступенчатой или плавной регулировкой акустической мощности (что очень важно в данных исследованиях и расчетах), цифровым частотомером и аналоговым индикатором резонанса акустической системы. Генератор имеет фазовую автоподстройку частоты и источник поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение генератора – воздушное принудительное, рабочая частота – 18–25 кГц. Масса генератора – 6,2 кг. Генератор ИЛ 10-0,4 позволяет выбирать режим работы ультразвукового оборудования для сварки полимерных пленок, при котором КПД акустического узла будет максимальным.

Основной особенностью сварки с автостабилизацией толщины сварного шва является деформация материала под рабочим торцом волновода, обусловленная термоползучестью и выдавливанием пластицированного материала из сварочной зоны. В этом случае толщина шва остается постоянной и практически не зависит от исходной толщины свариваемых пленок в диапазоне тех режимов сварки, которые изучались авторами. Увеличение статического давления приводит к линейному уменьшению остаточной толщины шва $h_{ост}$ так как при этом увеличивается объем вытесняемого из зоны сварки материала.

Явление автостабилизации толщины шва, по-видимому, можно объяснить следующим образом. В процессе термоползучести и вытеснения пластицированного материала происходит приближение холодного рабочего торца волновода к зоне максимального тепловыделения. Это вызывает увеличение теплоотвода из сварочной зоны. При некотором определенном значении остаточной толщины сварного шва устанавливается динамическое равновесие между тепловыделением и теплоотводом, или даже количество отводимой теплоты превалирует над количеством теплоты, выделяющейся вследствие гистерезисных потерь. В результате температура в сварочной зоне становится ниже температуры вязкотекучего состояния и дальнейшее утонение сварного шва прекращается.

Рис. 5. Влияние режима сварки двух слоев полиэтиленовой пленки толщиной 200 мкм на остаточную толщину шва ($P_{ст} = \text{const}$). Режим сварки:
а – на вращающемся ролике-опоре ($\omega \neq 0$); б – на неподвижном ролике-опоре ($\omega = 0$); в – с нижней теплоизоляционной прокладкой; г – с верхней теплоизоляционной прокладкой ($\omega \neq 0$).

Значительное влияние теплоотвода на этот процесс подтверждается также данными, приведенными на рис. 5. Наибольшее значение остаточной толщины сварного шва $h_{ш}$ имеет место при сварке на вращающемся ролике-опоре (частота его вращения $\omega \neq 0$), так как в этом случае в контакт с пленкой постоянно вступают холодные участки ролика-опоры. При сварке на неподвижном ролике-опоре ($\omega = 0$) условия теплоотвода ухудшаются вследствие некоторого разогрева ролика в точке контакта со свариваемой пленкой, что приводит к уменьшению остаточной толщины сварного шва $h_{ш}$. Наибольшее утонение происходит при использовании теплоизоляционных прокладок 3, помещаемых между волноводом 1 и пленкой 2 или между пленкой 2 и роликом-опорой 4 (рис. 5, в, г). Наименьшая остаточная толщина шва $h_{ш}$ достигается в случае, показанном на рис. 5, г, что свидетельствует о превалирующей роли в этом процессе теплоотвода в волновод.

При использовании теплоизоляционных прокладок происходит практически полное передавливание свариваемых пленок, причем по обе стороны от места ввода ультразвуковых колебаний образуются два автономных сварных соединения за счет вытесненного из сварочной зоны материала.

Утонение свариваемого материала в зоне шва оказывает значительное влияние на прочность сварного соединения. В случае, когда сварное соединение работает на сдвиг (рис. 6, а), прочность соединения довольно низкая, так как нагрузку воспринимает значительно ослабленное сечение а-а. Кроме того, в месте перехода от утолщения к тонкому шву создается концентрация напряжений, что также приводит к ослаблению сварного соединения. При испытании сварного соединения на раздир (рис. 6, б), наоборот, наибольшая прочность достигается при полном выдавливании материала из зоны ввода ультразвуковых колебаний, когда образуются два автономных соединения. При этом нагрузку воспринимает утолщенная часть сварного соединения, которую некоторые исследователи называют «сварочной гусеницей». В случае сварки с автостабилизацией толщины сварного шва нестабильность режима сварки и, в частности, непостоянство скорости сварки и толщины свариваемых пленок не оказывают существенного влияния на прочность сварного соединения.

Рис. 6. Схема испытания сварных соединений на сдвиг (а) и на раздир (б): 1 – свариваемая пленка; 2 – «сварочная гусеница»; P – разрывное усилие.

Если прочность сварного соединения в достаточно широком диапазоне режимов сварки остается практически неизменной (имеется в виду прочность при испытаниях по схеме, показанной на рис. 6б, сварного соединения, представляющего по существу два автономных соединения), то на производительность процесса режим сварки оказывает значительное влияние. Для качественной оценки этого влияния можно предположить, что разогрев пленок происходит адиабатически, а выделяющееся тепло равномерно распределено по толщине пленок. В этом случае для разогрева объема полимера, расположенного в контакте между волноводом и опорой, от начальной температуры T_0 до температуры T_g необходимо, чтобы в единицу времени выделялось следующее количество тепла:

$$Q = 2C\rho h_n V_{св} b(T_g - T_0) \quad (1)$$

где C и ρ — теплоемкость и плотность материала пленки; h_n — толщина пленки; $V_{св}$ — скорость сварки; b — ширина рабочего торца волновода.

С другой стороны, количество энергии, вводимой в свариваемый материал в единицу времени, равно:

$$W = 2\pi^2 f^2 A^2 r_{ак} S_k \quad (2)$$

где $r_{ак}$ — активная составляющая сопротивления нагрузки; S_k — площадь контакта, равная $l_k b$ (l_k — длина контактного пятна); A — амплитуда колебаний волновода; f — частота колебаний.

Считая, что вся эта энергия переходит в теплоту, из (1) и (2) получим:

$$V_{св} = \frac{9,86 \cdot 10^{-9} f^2 A^2 l_k r_{ак}}{C\rho h_n (T_g - T_0)} \quad (3)$$

Эта формула справедлива в том случае, если величины, входящие в нее, выражены в следующих единицах: f — с⁻¹; A — мкм; l_k — мм; $r_{ак}$ — Па·с/м; C — Дж/кг·К; ρ — кг/м³; h_n — мкм. При этом единица измерения $V_{св}$ — м/с.

Из формулы (3) следует вывод, подтверждаемый всеми исследователями, о том, что производительность сварки возрастает с увеличением амплитуды и частоты (причем эта зависимость носит квадратичный характер), а также с уменьшением температуры вязкотекучего состояния полимера. Что касается влияния толщины свариваемой пленки на скорость сварки, то здесь следует учитывать два обстоятельства.

С одной стороны, с увеличением толщины свариваемой пленки скорость сварки должна уменьшаться. Однако при этом происходит увеличение активной составляющей сопротивления нагрузки $r_{ак}$ что должно привести к возрастанию скорости сварки. В результате в некотором диапазоне толщин скорость сварки может не зависеть от толщины пленки.

С другой стороны, для пленок малой толщины начинает сказываться теплоотвод в холодные волновод и опору, который не учитывается в выражении (3). Это приводит к необходимости снижения скорости сварки, а при очень тонких пленках соединение вообще может не образоваться, так как количество выделяющейся энергии будет равно или меньше количества отводимой энергии.

По-видимому, трудности, с которыми сталкиваются при сварке тонких пленок, в большей мере обусловлены отрицательной ролью теплоотвода, нежели понижением с уменьшением толщины пленки.

Улучшение свариваемости тонких пленок может быть достигнуто за счет увеличения толщины свариваемого материала. Для этого можно использовать прокладки, изготовленные как из свариваемого материала, так и из другого материала, имеющего температуру текучести выше, чем у свариваемых пленок. Прокладку располагают либо между инструментом и пленкой (верхнее положение), либо между пленкой и опорой (нижнее положение).

Сварка с применением прокладок позволяет повысить прочность соединения почти в два раза. Сварные швы при этом имеют гладкую поверхность и прозрачны.

На качество соединения существенное влияние оказывает не только место расположения, но и материал прокладки. В качестве прокладок используются целлофан, фторопласт-4, ПЭТФ-пленка, бумага.

В случаях, когда нежелательно применять прокладку, привариваемую к пленке в зоне сварки, следует применять материалы, которые, обеспечивая наибольшую прочность сварного соединения,

легко отделяются от шва после сварки. Этим требованиям отвечают прокладки из бумаги толщиной 70–75 мкм, обеспечивающие прочность соединения, равную 55–60% прочности основного материала. Применение бумаги, имеющей пропитку, кальки или парафинированной оберточной бумаги нежелательно, так как они прилипают к свариваемой пленке, и при их удалении возможно повреждение соединения.

Значительное влияние на свариваемость полимерных пленок оказывают материал и геометрические размеры опоры, на которой размещаются пленки.

Опоры ультразвуковых сварочных машин подразделяют на активные, отражающие ультразвуковые колебания, и пассивные, поглощающие энергию колебаний. Для изготовления активных опор обычно используют материалы, обладающие хорошими прочностными и акустическими свойствами.

В качестве таких материалов применяют алюминиевые Д16Т и титановые ВТ1 сплавы, а также стали Ст3 и Ст45 [3, 7]. Однако предпочтение следует отдавать опорам из Ст3, так как акустическое сопротивление этой стали больше отличается от акустического сопротивления свариваемой пленки, чем сопротивление названных сплавов. Это обуславливает большую величину энергии, отражающейся от опоры и возвращающейся в пленки. При сварке на пассивных опорах, выполненных из дерева или резины, даже на очень малой скорости перемещения пленки под волноводом ($V_{св} = 0,01$ м/с) прочность соединения получается низкой.

Выводы

1. Рассмотрено влияние теплового режима ультразвуковой сварки на остаточную толщину сварного шва полимерных пленок при высокой производительности процесса и отсутствии деструкции свариваемых пленок.

2. Приведена кинетика образования сварных соединений околошовной зоны полимерных пленок, полученных при различных значениях сварочного статического давления, амплитуды колебаний волновода и скорости ультразвуковой сварки.

3. Для повышения прочности и качества сварного шва, а также для уменьшения теплоотвода в волновод и опору рекомендовано применять теплоизоляционные прокладки из целлофана или бумаги.

4. Загрязненность свариваемых поверхностей жидкими или сыпучими продуктами не влияет на свариваемость и прочность сварных соединений.

Литература

1. Крыжановский В.К., Бурлов В.В. Технические свойства полимерных материалов. Санкт-Петербург: Профессия, 2005. 235с.
2. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
3. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов: Учебное пособие для вузов. М.: Химия, 2001. 376 с.
4. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. М.: Химия, 1986. 256 с.
5. Мозговой И.В. Основы технологии ультразвуковой сварки полимеров: Учебное пособие. Изд-во Красноярского ГТУ, 1991. 280 с.
6. Волков С.С. Распределение мощности в ультразвуковой сварочной системе при сварке полимерных пленок // Сварочное производство. 2012. №10. С. 42–46.
7. Волков С.С., Бигус Г.А., Ремизов А.Л. Применение пьезокерамических преобразователей для ультразвуковой сварки полимерных пленок // Сварка и диагностика. 2016. №2. С. 53–57.