

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-21-29

Параметры режима ультразвуковой сварки полимерных материалов

С.С. Волков, А.Л. Ремизов, А.В. Коновалов, В.М. Неровный

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Parameters of the polymeric materials ultrasonic welding

S.S. Volkov, A.L. Remizov, A.V. Konovalov, V.M. Nerovniy

Bauman Moscow State Technical University

Установлено, что основными параметрами режима, определяющими производительность ультразвуковой сварки пластмасс, являются амплитуда колебаний рабочего торца волновода, статическое сварочное давление и время сварки. Ультразвуковую сварку можно проводить по поверхностям, покрытым различными продуктами. Получено выражение для определения времени и коэффициента интенсивности режима ультразвуковой сварки. Рассмотрено влияние опор на качество и прочность соединений при ультразвуковой сварке полимерных материалов. При использовании активной опоры прочность соединения и производительность ультразвуковой сварки значительно выше, чем при применении пассивных опор. Результаты экспериментов подтвердили взаимосвязь амплитуды колебаний опоры с нагревом, толщиной и свойствами свариваемых деталей. Предложен рабочий цикл ультразвуковой сварки пластмасс, в котором статическое сварочное давление и время ультразвукового воздействия, обеспечивают максимальную прочность и герметичность получаемого соединения.

Ключевые слова: параметры режима сварки, амплитуда колебаний, статическое сварочное давление, время сварки, рабочий цикл, частота колебаний

It was established that the mode parameters determining efficiency of the plastics ultrasonic welding process include waveguide oscillation amplitude, welding static pressure, oscillation frequency, welding time and size of the fixed gap between the waveguide working end and the support. In each specific welding mode, an increase in the gap of more optimal value leads to a decrease in the breaking load; this is especially true in welding products of higher thickness. Welding could be performed on surfaces coated with various products. An expression was obtained to determine time and intensity coefficients of the ultrasonic welding mode. Fixture supports influence on quality and strength of the welded joints in the ultrasonic welding of polymeric materials was considered. When using an active support, strength and productivity of ultrasonic welding was much higher than in using the passive supports. Results of the experiments confirmed the relationship between the support oscillations amplitude and the heating, thickness and properties of the parts to be welded. A working cycle of the plastics ultrasonic welding is proposed, where the static welding pressure and the ultrasonic pulse time are ensuring maximum strength and tightness of the welded joint.

Keywords: welding mode parameters, oscillation amplitude, static welding pressure, welding time, duty cycle, oscillation frequency

Способ ультразвуковой сварки (УЗС) заключается в том, что электрические колебания ультразвуковой частоты (18...24 кГц), вырабатываемые ультразвуковым генератором (УЗГ), преобразуются в механические продольные ультразвуковые колебания (УЗК) магнито-стрикционного преобразователя и вводятся в свариваемый материал с помощью продольно-колеблющегося волновода-инструмента (далее волновод), расположенного перпендикулярно к свариваемым поверхностям.

Часть энергии механических УЗК переходит в тепловую, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых поверхностей до температуры вязкотекучего состояния. Надлежащие условия ввода механических УЗК и создание тесного контакта обеспечиваются статическим сварочным давлением (далее статическое давление) $p_{ст}$ рабочего торца (РТ) волновода на свариваемые детали (рис. 1) [1, 2].

Отличительной особенностью УЗС пластмасс является то, что механические УЗК вводятся перпендикулярно к свариваемым поверхностям и совпадают с направлением приложения статического давления $p_{ст}$ [1, 2].

К основным достоинствам УЗС пластмасс относятся высокая производительность и куль-

тура процесса, возможность сварки поверхностей, загрязненных различными продуктами, и выполнения сварного соединения (СС) в труднодоступных местах, а также локальное выделение теплоты в зоне УЗС, что исключает перегрев материала, как это имеет место при сварке нагретыми газами, инструментом и т. д. [2–4].

С учетом указанных достоинств и возможности автоматизации процесса можно полагать, что УЗС — самый благоприятный способ сварки пластмассовых изделий [5, 6].

Цель работы — исследование влияния параметров режима УЗС полимерных материалов на производительность процесса, прочность и герметичность СС.

УЗС применяют при изготовлении изделий пищевой и легкой промышленности, парфюмерии, электротехники и товаров широкого потребления.

Одна из основных задач УЗС заключается в систематическом стабильном получении СС одинакового качества и заданной прочности при высокой производительности процесса. Размеры и структура СС определяются в основном тепловыми процессами, зависящим от многих параметров режима УЗС [3, 5].

Параметры режима сварки принято подразделять на основные и дополнительные, что целесообразно и для УЗС пластмасс. К основным параметрам режима УЗС относятся те, которые непосредственно влияют на количество механической энергии, подводимой к свариваемым материалам и превращаемой в тепловую энергию. Такими параметрами являются: A — амплитуда колебаний РТ волновода, мкм; f — частота его колебаний, кГц; $t_{св}$ — время УЗС, с; v — скорость УЗС (в случае шовной сварки), м/с; $p_{ст}$ — статическое давление, Па; F — усилие прижима волновода к материалу, Н [1–3].

Если дозирование подводимой механической ультразвуковой энергии происходит по специальным схемам (например, при сварке с фиксированным зазором или фиксированной осадкой), то зазор или допустимую осадку можно считать основными параметрами. При сварке с предварительным и сопутствующим подогревом или охлаждением соединяемых деталей температуру подогрева или охлаждения также следует отнести к основным параметрам вследствие изменения теплофизических и релаксационных характеристик материала, влияющих на интенсивность преобразования механической энергии в тепловую [1, 5, 7].

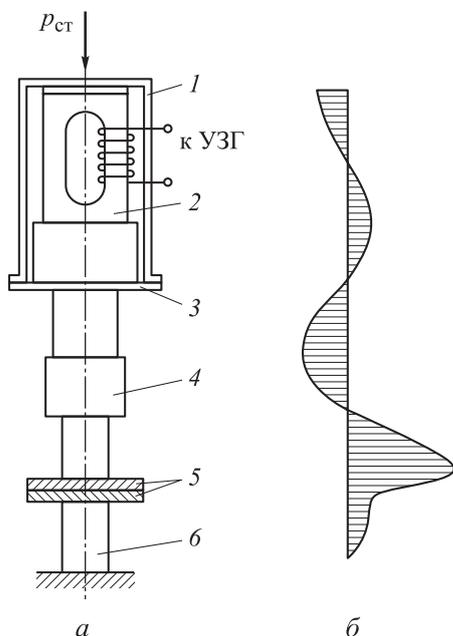


Рис. 1. Схема установки для УЗС с нормальным вводом колебаний (а) и эпюра амплитуды колебаний волноводной акустической системы (б):

- 1 — корпус магнитострикционного преобразователя;
- 2 — магнитострикционный преобразователь с обмоткой;
- 3 — трансформатор упругих колебаний;
- 4 — волновод; 5 — свариваемые детали; 6 — опора;
- A — амплитуда колебаний волновода

В качестве дополнительных параметров режима УЗС выступают те, с помощью которых можно регулировать непроизводительные затраты энергии (энергию механических УЗК, безвозвратно теряемую в опоре или станине ультразвуковой сварочной машины, или теплоту, уходящую из сварочной зоны вследствие теплоотвода в холодные волновод и опору). К дополнительным параметрам режима УЗС относятся размеры, форма, материал опоры, волновода и теплоизоляционных прокладок, температура предварительного подогрева волновода и т. д. [1, 7, 8].

В последние годы успешно разрабатываются расчетные методы определения основных параметров режима УЗС пластмасс и синтетических тканей. Однако поскольку оптимальный режим УЗС зависит от таких трудно учитываемых факторов, как свойства свариваемых материалов, толщина и форма изделия, состояние контактирующих и других поверхностей, значения основных параметров уточняют в каждом конкретном случае экспериментально [2, 3, 8].

В процессе УЗС возможны отклонения от оптимального режима, вызванные, например, колебаниями напряжения питающей сети, нагревом волновода, изменением давления, выходом колебательной системы из резонанса и т. д. В связи с этим важно определить влияние различных параметров на прочность СС.

Правильность выбранного режима оценивают по прочности СС. В зависимости от требований, предъявляемых к сварному изделию, проверяют его герметичность, деформацию и другие показатели [2, 9, 10].

Амплитуда колебаний РТ волновода. Как показали исследования, проведенные на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при УЗС амплитуда колебаний РТ волновода должна иметь определенное значение. Ее уменьшение относительно номинального значения не обеспечивает необходимой деформации полимера, приводящей к разогреву поверхности деталей до вязкотекучего состояния.

Увеличение амплитуды колебаний РТ волновода сопровождается разрушением зон схватывания и снижением прочности СС. В целях корректирования режима УЗС амплитуду РТ волновода можно перестраивать в небольших пределах. Однако ее перестройка в процессе УЗС вызывает трудности, связанные

с изменением колебаний и стабилизацией этой величины.

Амплитуду колебаний РТ волновода можно перестроить, изменяя коэффициент усиления усилителя УЗГ или настраивая УЗГ на собственную частоту системы волновод — магнитоstrictionный преобразователь [1, 11, 12].

Следует учитывать, что амплитуда РТ волновода под нагрузкой ниже, чем на холостом ходу. Это обусловлено тем, что при расчете резонансной длины волновода его рассматривают как стержень, свободный на концах. Отсутствие учета характера нагрузки на РТ волновода приводит к выходу акустической системы из резонанса, особенно при высоком статическом давлении [3, 11, 13].

Так, обнаружено, что при малой амплитуде колебаний РТ на холостом ходу разница между ее значением и амплитудой колебаний РТ при работе волновода под нагрузкой, незначительна. При линейном увеличении амплитуды колебаний РТ волновода на холостом ходу практически линейно повышается и его амплитуда при работе под нагрузкой, причем разница между этими амплитудами возрастает. При амплитуде колебаний на холостом ходу, равной 60...65 мкм, амплитуда колебаний при работе под нагрузкой принимает некоторое постоянное значение (в данном случае 36 мкм), поэтому стабилизируется и время до начала плавления кристаллитов.

Амплитуда колебаний, вводимых в материал, а следовательно, и подводимая ультразвуковая механическая энергия, и их распределение зависят от ряда факторов, среди которых наибольшее значение имеют длина свариваемых деталей, статическое давление и характер опоры, на которой выполняют УЗС [1, 4].

Опоры ультразвуковых сварочных машин подразделяют на активные, отражающие УЗК, и пассивные, поглощающие энергию УЗК. Многие исследователи считают более рациональной сварку на активной опоре [1, 2, 5]. Для изготовления активных опор обычно используют материалы, обладающие хорошими прочностными и акустическими свойствами (сталь 45, 30ХГСА, титан и др.).

Для сварки изделий со сложной геометрической поверхностью часто применяют пассивные опоры, рабочая поверхность которых должна точно соответствовать поверхности свариваемой детали. Действие таких опор основано на поглощении излучаемой энергии, поэтому их изготавливают из материалов, га-

сящих УЗК (из резины, древесины, текстолита и т. д.). В конструкцию пассивных опор часто входят приспособления, удерживающие детали в гнезде опор [1, 8].

Исследование распределения характеристик ультразвукового поля проводили в поляризованном свете на свариваемых деталях с поперечным сечением $10 \times 15 \text{ мм}^2$ и длиной 45 мм. В качестве опоры использовали опоры из стали 45 и древесины.

Путем выбора опоры можно сдвигать максимумы напряжения по длине свариваемой детали. Однако следует учитывать, что опора из древесины обладает малой теплопроводностью, и на границе между ней и свариваемой пластмассовой деталью возникают значительные динамические напряжения. Это приводит к нежелательному нагреву, размягчению или разрушению детали в этом месте [3, 7].

Так как во всех опытах амплитуда колебаний РТ волновода на холостом ходу и статическое давление были одними и теми же (35 мкМ и 1,5 МПа соответственно), исследовали влияние только размеров свариваемых деталей и вида опоры на прочность СС. Максимальная амплитуда колебаний РТ волновода достигалась при длине деталей, равной 40...45 мм.

В экспериментах не наблюдалось существенного спада амплитуды колебаний РТ волновода на входе в деталь, если ее длина превышала 45 мм. При длине детали меньше 45 мм амплитуда колебаний РТ волновода на входе с использованием активных опор оказывалась достаточно большой и уменьшалась только при такой длине, когда деталь практически превращалась в пластину.

При применении опор из древесины амплитуда колебаний РТ волновода на входе в свариваемую деталь значительно снижалась с ростом ее длины. Большая амплитуда колебаний РТ на входе и малая теплопроводность при УЗС на деревянных опорах должны приводить к незначительному повышению производительности процесса [3, 8, 13].

Амплитуда колебаний волновода на входе в свариваемый материал и ее распределение в нем также зависят от площади РТ волновода. Для точечных волноводов угол рассеяния УЗК определяется выражением

$$\varphi = 1,26\lambda/d,$$

где λ — длина волны УЗК в полимере; d — диаметр РТ волновода.

При малом диаметре РТ волновода существенно возрастает рассеяние ультразвуковой энергии, что приводит к увеличению времени УЗС и уменьшению предельных свариваемых толщин. В работе [8] показано, что оптимальным является диаметр РТ волновода, равный 15 мм.

Превышение оптимального значения амплитудой колебаний вызывает сильный разогрев полимера непосредственно под волноводом, что может сопровождаться деструкцией, появлением пузырьков, выпучиваний и выплесков размягченного материала.

После окончания УЗС поверхность шва оказывается неровной, пористой, имеет наплывы и другие дефекты, в результате чего прочность СС падает. Это обусловлено тем, что при большой амплитуде колебаний происходит отрыв РТ волновода от поверхности расположенной под ним свариваемой детали в случае отрицательного статического давления и удар при его положительном значении.

Уменьшение амплитуды колебаний волновода ниже оптимального значения также снижает прочность СС. В этом случае вводимая механическая ультразвуковая энергия недостаточна для образования СС или требуется значительное время сварки, что, как и при повышенной амплитуде колебаний, приводит к разогреву полимера под волноводом и уменьшению прочности СС [7, 11]. Оптимальная амплитуда колебаний РТ волновода на холостом ходу обычно составляет 30...50 мкМ.

Статическое давление. С помощью статического давления осуществляется акустический контакт между поверхностями свариваемых деталей и между деталями и волноводом. Кроме того, статическое давление является необходимым условием для протекания процессов объемного взаимодействия в зоне контакта свариваемых деталей.

Зависимость прочности СС от статического давления, как правило, имеет экстремальный характер. Большинство исследователей [2, 4, 5] полагают, что низкая прочность СС при небольшом статическом давлении связана с подводом к деталям малой энергии из-за недостаточного контакта. В этом случае могут наблюдаться размягчение и деформация материала под волноводом вследствие ударного нагружения. С увеличением статического давления до определенного предела повышается не только прочность СС, но и скорость сварки.

По вопросу уменьшения прочности при превышении статическим давлением оптимального значения единого мнения до сих пор не существует.

Обнаружено понижение температуры, достигаемой на границе свариваемых деталей, с увеличением статического давления. В связи с этим высказано предположение, что материал не достигает вязкотекучего состояния, поэтому свариваемость ухудшается. Однако здесь не учитывалась зависимость температуры перехода в вязкотекучее состояние от статического давления [7, 12].

Пренебрежение зависимостью энергии активации свариваемых поверхностей от времени релаксации полимера позволило установить, что температура перехода в вязкотекучее состояние линейно падает с ростом статического давления.

Большинство исследователей [2, 4, 5, 9] объясняют уменьшение прочности СС при статическом давлении, превышающем оптимальное значение, снижением амплитуды колебания РТ волновода вследствие заземления акустического сварочного узла и нарушения резонансного режима работы ультразвуковой сварочной установки. Так, при УЗС полистирола изменение статического давления от 0 до 4 МПа привело к падению амплитуды колебаний РТ волновода с 40 до 20 мкм.

Аналогичные данные [8] получены для точечного и контурного волновода, работающих от магнитоотрицательного преобразователя, и для ножевого волновода, функционирующего совместно с пьезокерамическим преобразователем. Наиболее существенное падение амплитуды колебаний РТ наблюдалось при применении пьезокерамического преобразователя (что обусловлено высокой добротностью акустической системы), а также в случае контурных волноводов, где использованы изгибные колебания нижнего конуса [8, 13].

При работе точечных и ножевых волноводов от магнитоотрицательного преобразователя амплитуда колебаний заметно уменьшается, а при сварке мягких пластмасс (полиэтилена и полипропилена) практически не изменяется. Высказано предположение, что снижение прочности СС при УЗС мягких пластмасс связано не столько с падением амплитуды колебаний волновода вследствие повышения статического давления, сколько с ростом скорости деформации полимера и уменьшением толщины

шва. В этих случаях при очень большом статическом давлении может произойти полное перерезание полимерного материала.

Время УЗС. Достаточно обширный экспериментальный материал [2, 4, 5] свидетельствует о том, что можно подобрать достаточно большое количество сочетаний параметров A , $p_{ст}$ и f , позволяющих создать высококачественное СС. При этом изменяется только время УЗС. Если параметры A , $p_{ст}$ и f малы, то время УЗС велико (и наоборот). Это указывает на то, что существует определенный количественный показатель интенсивности режима УЗС, комплексно учитывающий вклад параметров A , $p_{ст}$ и f в рабочий процесс.

Таким показателем может являться произведение $Af(p_{ст} - p_0)$, где параметру p_0 следует придать смысл того минимального статического давления, при котором осуществляется акустический контакт, т. е. при $p_{ст} = p_0$ нельзя выполнить УЗС.

За единицу измерения интенсивности режима сварки выберем интенсивность так называемого режима приведения с амплитудой колебаний $A_{пр}$, давлением $p_{пр}$ и частотой $f_{пр}$. Тогда безразмерная величина, названная коэффициентом интенсивности режима сварки,

$$K_p = \frac{fA(p_{ст} - p_0)}{f_{пр}A_{пр}(p_{пр} - p_0)}$$

будет характеризовать интенсивность режима УЗС.

При $p_{ст} > p_{пр}$ дальнейшее изменение давления не приводит к изменению времени УЗС, поэтому расчет коэффициента интенсивности режима сварки K_p следует проводить при условии $p_{ст} = p_{пр}$.

Так как коэффициент интенсивности режима K_p пропорционален амплитуде колебаний волновода, а время УЗС — числу циклов нагружения волноводом на свариваемые детали толщиной δ , время сварки определяется выражением

$$t_{св} = \frac{(p_{ст} - p_0)\rho c_p}{E\eta K_p \delta}, \quad (1)$$

где c_p — теплоемкость материала при постоянном давлении; ρ — плотность; E — динамический модуль упругости; η — коэффициент механических потерь при комнатной температуре.

Таким образом, из условия (1) установлен факт подобия акустических циклов при УЗС,

характеризуемый постоянством их характера: при изменении режима сварки и толщины деталей они растягиваются или сжимаются во времени.

Кроме того, из этого вытекают пути активного управления процессом УЗС пластмасс с целью стабилизации всех параметров режима сварки. Такое управление может заключаться в уменьшении коэффициента интенсивности режима сварки K_p путем снижения к концу процесса сварки амплитуды колебаний РТ волновода [6], либо за счет уменьшения или даже полного снятия статического давления при сохранении неизменным положения сварочного магнотрикссионного узла относительно опоры. Это не приведет к остановке ультразвукового сварочного процесса, так как восстановлению материала до исходной толщины препятствует колеблющийся волновод.

Рабочие циклы при УЗС. В последнее время ученые все больше внимания уделяют разработке рабочих циклов УЗС с изменением параметров режима. При УЗС пластмасс рабочий цикл определяется последовательностью при-

ложения статического давления, подачи, прохождения и прекращения подачи ультразвукового воздействия (УЗВ), выдержки изделия под статическим давлением и снятия последнего. В процессе УЗС статическое давление может оставаться постоянным или изменяться.

Рабочий цикл УЗС во многом определяет прочность СС, поэтому при разработке технологии и ультразвуковых сварочных машин его закладывают в основу выбора принципиальной схемы механизма статического давления и включения и выключения УЗК.

Самый распространенный рабочий цикл УЗС статическое давление — УЗВ показан на рис. 2, а, где $t_{УЗВ}$ — продолжительность УЗВ. Статическое давление $p_{ст}$ прикладывается к свариваемым деталям до начала УЗВ ($t_{пр}$ — время предварительного сжатия), остается постоянным в течение всего сварочного цикла и снимается с запаздыванием на время t_3 .

Кинетика предварительного сжатия зависит от природы и свойств свариваемых материалов, геометрических характеристик деталей, статического давления и других факторов. Охлаждение сварного шва начинается в тот момент, когда детали сжаты между волноводом и опорой, и заканчивается, как правило, на воздухе. Охлаждение СС под давлением существенно влияет на повышение его прочности.

Время УЗС, зависящее от толщины свариваемых полимеров, выбирают в диапазоне 0,1...5,0 с. Такой цикл УЗС используют на разработанных на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана ультразвуковых установках УПК-15, УП-20, УПТ-14 и др. Статическое давление создают как с помощью пневматических систем, так и пружинными механизмами.

Чтобы определить влияние времени предварительного сжатия $t_{пр}$ на разрывную нагрузку СС, УЗВ выполняли в моменты, соответствующие неустановившейся и установившейся деформациям сжатия. Независимо от комбинации свариваемых материалов максимальное значение разрывной нагрузки соответствовало моменту подачи УЗВ на стадии установившейся деформации сжатия.

Отметим, что значения разрывной нагрузки в зависимости от момента УЗВ могут изменяться в пределах 50 %. Большое значение для получения высококачественного СС имеет охлаждение шва под давлением в течение времени t_3 . Так, при сварке полиэтилена низкой

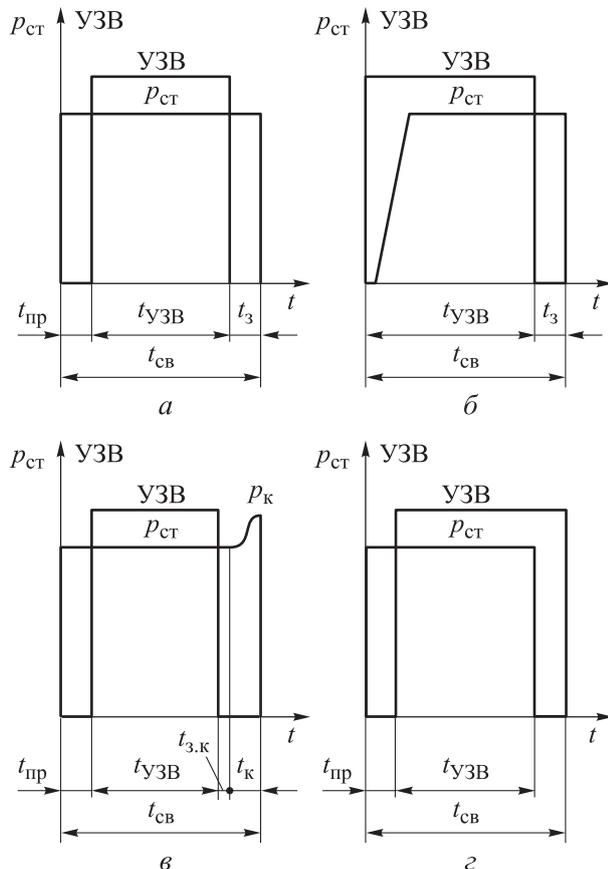


Рис. 2. Рабочие циклы при УЗС пластмасс

плотности выдержка под давлением в течение 3 с позволяет повысить прочность СС на 40...50 % [8].

При цикле УЗВ — статическое давление (рис. 2, б) подача УЗК происходит до приложения статического давления. Первоначальное УЗВ дает возможность очищать свариваемые поверхности, загрязненные различными веществами. В этом случае статическое давление прикладывают к деталям постепенно. Касаясь изделия, волновод сообщает ему механические УЗК, тем самым очищая поверхность прежде, чем наступает сварка. По окончании УЗВ статическое давление снимают с запаздыванием на время t_3 .

При сварке по этой схеме применяют волновод, на рабочей поверхности которого имеется выступ с насечкой. При его внедрении в расплавленный свариваемый полимер одновременно происходит сварка изделия и нанесение рисунка насечки на поверхность шва.

Такой рабочий цикл используют для сварки полиэтиленовых коробок и туб, наполненных жидкостями, имеющими большую вязкость. Регулирование статического давления осуществляется с большой точностью [3, 8].

В некоторых случаях для увеличения прочности СС необходимо после прекращения УЗВ повысить статическое давление (рис. 2, в). Повышенное давление p_k (ковочное усилие) должно следовать за окончанием УЗВ через небольшой, строго контролируемый интервал времени $t_{3,к}$.

При чрезмерно большом интервале времени $t_{3,к}$ применение проковки нежелательно, так как свариваемый материал успевает остыть до

ее начала. При очень малом интервале времени $t_{3,к}$ возможно выдавливание расплавленного материала из-под волновода под действием значительного ковочного усилия p_k . В этом случае возможны выплески и прожоги полимера.

Такой цикл часто применяют, когда необходимо получить герметичный сварной шов на объемных деталях, выполненных из ударопрочного полистирола. При этом используют специальные разделки кромок шва в виде клиновидных замковых канавок, где предусмотрены допуски на растекание расплавленного полимера.

На рис. 2, г показан нежелательный вариант рассмотренного цикла УЗС пластмасс, при котором прекращение УЗВ происходит при предварительном снятом статическом давлении. Предварительное снятие статического давления при УЗВ и подъем сварочного узла от свариваемой поверхности ведет к ухудшению качества СС, значительному вспучиванию привариваемой поверхности (шов в некоторых случаях имеет гофры).

Выводы

1. Установлено, что основными параметрами режима УЗС пластмасс являются амплитуда колебаний РТ волновода, статическое давление и время сварки.

2. Экспериментально определено, что рабочий сварочный цикл, включающий в себя статическое давление и УЗВ на свариваемые детали, обеспечивает получение максимальной прочности и герметичности СС.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С., Коновалов А.В., Выборнов А.П. Методика расчета параметров режима ультразвуковой сварки изделий из полимерных материалов. *Сварка и диагностика*, 2016, № 2, с. 35–39.
- [3] Волков С.С. Влияние режима ультразвуковой шовной сварки полимерных пленок на образование швов и производительность процесса. *Сварочное производство*, 2013, № 11, с. 38–42.
- [4] Комаров Г.В. *Способы соединений деталей из пластических масс*. Москва, Химия, 1979. 288 с.
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Heated tool ultrasonic welding of elastic containers produced from fluoroplastic film. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 492–496, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1090180>
- [6] Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А. *Автоматизация сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 426 с.

- [7] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политех. унив-та, 2013. 646 с.
- [8] Волков С.С. Основные параметры режима ультразвуковой контурной сварки емкостей из полиэтилена. *Сварочное производство*, 2010, № 6, с. 43–47.
- [9] Неровный В.М., ред. *Теория сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
- [10] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 9, pp. 720–724, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753281>
- [11] Volkov S.S. Technology for ultrasonic welding multielement components produced from rigid plastic. *Weld. Int.*, 2004, vol. 18, no. 3, pp. 242–245, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2004.3273>
- [12] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastic. *Weld. Int.*, 2008, vol. 22, no. 3, pp. 193–197, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802065561>
- [13] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 3, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>

References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [2] Volkov S.S., Konovalov A.V., Vybornov A.P. Calculation method for ultrasonic welding of polymer products. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2016, no. 2, pp. 35–39. (In Russ.).
- [3] Volkov S.S. Effect of the ultrasonic seam welding conditions of polymer films on seam formation and process flow. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 11, pp. 38–42. (In Russ.).
- [4] Komarov G.V. *Sposoby soedineniy detaley iz plasticheskikh mass* [Methods of connecting plastic parts]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 288 p. (In Russ.).
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Heated tool ultrasonic welding of elastic containers produced from fluoroplastic film. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 492–496, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1090180>
- [6] Gladkov E.A., Brodyagin V.N., Perkovskiy R.A. *Avtomatizatsiya svarochnykh protsessov* [Automation of welding processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 426 p. (In Russ.).
- [7] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes at welding]. Sankt-Petersburg, Izd-vo Politekh. univ-та Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [8] Volkov S.S. Critical parameters of the outline ultrasonic welding conditions for the polyethylene containers. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2010, no. 6, pp. 43–47. (In Russ.).
- [9] Neronnyy V.M., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 752 p. (In Russ.).
- [10] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 9, pp. 720–724, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753281>
- [11] Volkov S.S. Technology for ultrasonic welding multielement components produced from rigid plastic. *Weld. Int.*, 2004, vol. 18, no. 3, pp. 242–245, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2004.3273>
- [12] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastic. *Weld. Int.*, 2008, vol. 22, no. 3, pp. 193–197, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802065561>
- [13] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 3, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>

Статья поступила в редакцию 18.11.2022

Информация об авторах

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

РЕМИЗОВ Андрей Леонидович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: remizoff.andrew@mail.ru).

КОНОВАЛОВ Алексей Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Ремизов А.Л., Коновалов А.В., Неровный В.М. Параметры режима ультразвуковой сварки полимерных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 4, с. 21–29, doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-21-29

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Remizov A.L., Konovalov A.V., Nerovniy V.M. Parameters of the polymeric materials ultrasonic welding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 4, pp. 21–29, doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-21-29

Information about the authors

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

REMIZOV Andrey Leonidovich — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: remizoff.andrew@mail.ru).

KONOVALOV Alexey Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

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