

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-54-62

Особенности процесса разогрева при ультразвуковой сварке изделий из поликарбоната в условиях независимого давления

С.С. Волков, А.Л. Ремизов, А.С. Панкратов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Features of the Heating Process in Ultrasonic Welding of Polycarbonate Products under Independent Pressure

S.S. Volkov, A.L. Remizov, A.S. Pankratov

Bauman Moscow State Technical University

Описан механизм образования соединения трудносвариваемого поликарбоната ультразвуковой сваркой, который состоит в том, что в его зоне на стыкуемых поверхностях вследствие сдвиговых колебаний торца верхней детали относительно нижней возникает внутреннее и внешнее трение. При этом образуется локализованная по толщине прослойка разогретого свариваемого материала, в котором происходит преимущественное поглощение ультразвуковых колебаний. Это позволяет получать качественные и прочные сварные соединения без существенной деформации благодаря концентрации тепловой энергии в сварочной зоне. Исследовано влияние независимого сварочного давления на прочность сварного соединения поликарбоната. Предложен новый способ ультразвуковой сварки в условиях независимого давления, заключающийся в разделении статического сварочного давления на две составляющие — давление акустического контакта в зоне соприкосновения волновода с изделием и сварочное давление, обеспечивающее сжатие свариваемых изделий. Причем вторая составляющая меньше первой. Для получения качественного соединения из поликарбоната и предотвращения смещения свариваемых кромок относительно друг друга разработана их разделка, позволяющая перемещать одну деталь относительно другой вертикально в процессе сварки. Установлено, что качество такой сварки зависит от скорости перемещения и угла разделки кромок.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, давление акустического контакта, статическое сварочное давление, прочность сварного соединения, независимое давление, разделка кромок

This paper presents a mechanism of formation of a hard-to-weld polycarbonate joint by ultrasonic welding. The method utilizes internal and external friction occurring in the welded joint area on abutting surfaces due to shear vibrations of the end of the upper part relative to the lower part. A layer of the heated welded material is formed, localized by thickness, in which predominant absorption of the ultrasonic vibrations occurs, which allows one to obtain high-quality and durable welded joints without significant deformation due to the concentration of thermal energy in the welding zone. The effect of independent welding pressure on the strength of the welded joint of polycarbonate is considered. A new method of ultrasonic welding under the conditions of independent pressure is

proposed. The method consists of dividing the static welding pressure into two components: the pressure of the acoustic contact in the zone of contact of the waveguide with the product, and the welding pressure that compresses the welded products, with the latter component being lower than the former. In order to obtain high-quality welded joints made of polycarbonate and to prevent displacement of the welded edges during the welding process relative to each other, a special preparation of the welded edges is developed, which allows one part to be moved vertically relative to the other during the welding process. It is established that the quality of welding depends on the speed of movement and the angle of cutting the edges.

Keywords: ultrasonic welding, acoustic contact pressure, static welding pressure, weld strength, independent pressure, edge preparation

В последние годы изделия из жестких пластмасс, в частности из поликарбоната, приобрели большое значение в промышленности.

Отличительной особенностью поликарбоната от других жестких материалов является сочетание таких ценных свойств, как большая прочность в широком диапазоне рабочих температур, высокая удельная ударная вязкость, прозрачность и химическая стойкость. Кроме того, сравнительная дешевизна позволяет широко использовать их для изготовления высоконагруженных ответственных конструкций и изделий, работающих при значительных статических и динамических нагрузках. Однако обладая ценными свойствами, поликарбонат является трудносвариваемым полимерным материалом [1, 2].

Трудности формирования сварного соединения (СС), связаны с такими свойствами поликарбоната, как высокая температура плавления ($T_{пл} = 280...300\text{ }^{\circ}\text{C}$), узкий интервал вязкотекучего состояния, большая удельная вязкость расплава, склонность поликарбоната к поглощению влаги, а следовательно, к термоокислительной деструкции.

Эти обстоятельства предъявляют жесткие требования к процессу сварки по времени пребывания поликарбоната при высокой температуре [3]. По мнению большинства исследователей [4–6], при соединении трудносвариваемых полимеров, к которым относится и поликарбонат, следует отдать предпочтение таким способам соединения, при которых происходит локализованный в зоне СС разогрев полимерного материала.

Этому требованию удовлетворяют способы с генерацией тепловой энергии непосредственно в зоне соединения при сварке трением, токами высокой частоты и ультразвуком. Проведенный анализ литературы, а также предварительные исследования показали, что наиболее простым

и доступным способом соединения рассматриваемых изделий является ультразвуковая сварка (УЗС) [5, 7, 8].

Важное достоинство УЗС поликарбоната — интенсивный разогрев материала в зоне СС без доступа атмосферы в область физического контакта свариваемых поверхностей. Поэтому, основываясь на достигнутых результатах поисковых исследований для соединения изделий из поликарбоната кольцевой формы свариваемого стыка использовали УЗС [8, 9].

При сварке установлено, что по периметру стыка наряду с образованием качественного СС имеют место участки с прожогами или непроварами. Кроме того, при сварке традиционными способами в зоне шва возникают трещины. Явление растрескивания поверхности поликарбоната известно с начала его производства и применения в промышленности [1, 2, 6].

Цель работы — исследование возможности получения качественного и прочного СС поликарбоната в условиях независимого давления.

Согласно современным представлениям о процессе УЗС в зоне СС происходят достаточно сложные явления: превращение ультразвуковой механической энергии в тепловую, диффузия макромолекул, акустическое течение расплава полимера и др. Все эти явления определяются схемой ввода ультразвуковых колебаний (УЗК) в свариваемые детали и интенсивностью их воздействия.

Основным параметром, определяющим прочность СС, является тепловой режим процесса сварки, который в основном зависит от количества вводимой в зону соединения энергии УЗК. Скорость протекания процесса в зоне шва определяется температурой его материала. В связи с этим необходимо изучить характер теплообразования в изделиях из поликарбоната в процессе УЗС под действием УЗК.

К настоящему времени не сложилось единого мнения о процессе теплообразования. Согласно результатам проведенного анализа, энергия в зоне связываемых поверхностей может выделяться вследствие гистерезисных потерь, внешнего и внутреннего трения [3, 7]. Механизм внутреннего трения в твердом теле весьма сложен.

При прохождении УЗК через свариваемые детали наблюдается петля механического гистерезиса. Градиент скорости, создаваемый волной напряжения, приводит к потерям, связанным с вязкостью материала. Кроме того, в поликарбонате наблюдается механическая релаксация и т. п. Потери в результате внутреннего трения вследствие несовершенства упругости поликарбоната зависят от физических свойств и структуры материала, частоты колебаний механических напряжений и температуры [3, 10].

Как известно, внешнее трение — процесс нелинейный. Существует несколько гипотез относительно природы этого явления. Согласно молекулярной гипотезе, трение — результат молекулярного взаимодействия двух поверхностей при их сближении до расстояний, на которых действие сил такого взаимодействия становится заметным.

В соответствии с молекулярно-механической гипотезой трение является результатом как механического, так и молекулярного взаимодействия свариваемых поверхностей. Кроме того, некоторые исследователи полагают, что внешнее трение определяется чисто механическим взаимодействием поверхностей, а именно выступы одного материала, цепляясь за микровыступы другого, препятствуют их относительному перемещению [5, 7, 11].

На коэффициент трения влияют многочисленные факторы: природа материала, температура в зоне трения, характер контактирования тел, размер и шероховатость поверхности, нормальное давление, скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей. Учет изменения силы трения в процессе УЗС осложнен еще и тем, что в результате повышения температуры изменяются свойства материалов. Площадь фактического контактирования растет, так как она является функцией сжимающей нагрузки, действия УЗК и формы сварочного волновода [3, 4, 12].

Таким образом, на процесс теплообразования влияют многие факторы, которые необхо-

димо учитывать при вычислении баланса энергии, выделяющейся в сварочной зоне в результате соединения поликарбонатов [1, 3]. Баланс энергии при УЗС поликарбоната определяется следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

где Q_{Σ} — суммарная энергия, выделяющаяся в зоне сварки; Q_1 , Q_2 и Q_3 — энергия, выделяющаяся вследствие гистерезисных потерь (при циклическом деформировании), внешнего поверхностного трения и ударов соответственно; Q_4 — энергия, выделяющаяся в результате побочного эффекта — химического течения, обусловленного разрывами и перегруппировками химических связей при действии УЗК [2, 3].

Энергия, выделяющаяся в полимере при деформации материала на гистерезис, определяется выражением

$$Q_1 = \frac{\varepsilon_0^2 E \omega \eta \Delta t}{2},$$

где ε_0 — амплитуда динамической деформации материала; E — динамический модуль упругости; ω — круговая частота УЗК; η — коэффициент механических потерь; Δt — время пропускания УЗК.

Смещение связываемых поверхностей относительно друг друга пропорционально удвоенной амплитуде поперечных колебаний. Необходимо отметить, что с уменьшением давления сварки растет вероятность поперечного колебания соединяемых поверхностей. Поперечные колебания начинают появляться при давлении меньшем, чем давление акустического контакта.

Энергия, выделяющаяся вследствие внешнего поверхностного трения, определяется выражением

$$Q_2 = p_{св} A_{п} \omega K_{тр} \Delta t,$$

где $p_{св}$ — статическое сварочное давление; $A_{п}$ — амплитуда поперечных колебаний; $K_{тр}$ — коэффициент трения полимер — полимер.

При УЗС поперечные колебания вызывают поверхностное трение, приводящее к быстрому разогреву полимеров в зоне контакта и их переходу в размягченное состояние. Образовавшаяся при этом мягкая прослойка интенсивно поглощает энергию механических УЗК, что приводит к еще большему разогреву полимера на границе раздела соединяемых деталей.

Исходя из изложенного, можно предположить, что при УЗС поликарбоната энергия выделяется вследствие внешнего и внутреннего трения [3, 4].

Для расчета и определения суммарной энергии, затрачиваемой на образование СС и не зависящей от схемы УЗС и источника энерговыделения, в эксперименте фиксировали максимальную температуру в зоне СС и время ее протекания.

Процесс тепловыделения УЗС поликарбоната является в некоторой степени саморегулируемым, так как при достижении полимером вязкотекучего состояния интенсивность тепловыделения в нем снижается. Поэтому, несмотря на то, что температура свариваемых поверхностей с течением времени увеличивается, в некоторых точках начинается деструкция материала. Для получения равнопрочного СС при УЗС поликарбоната необходимо стремиться к уменьшению статического сварочного давления на соединяемые поверхности. Таким образом, суммарная энергия определяется по формуле

$$Q_{\Sigma} = \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0^2 E \eta + p_{\text{св}} A^n K_{\text{тр}} \right) \omega \Delta t.$$

В целях определения влияния перечисленных факторов на показатели качества СС путем создания условий для равномерного нагрева по всему периметру соединяемых поверхностей, для равномерного и быстрого удаления грата из зоны сварного шва без деструкций и снижения его деформаций разработана схема сварки, получившая название сварки в условиях независимого давления.

В связи с этим при передаточной УЗС поликарбоната предложено разделить статическое сварочное давление на две составляющие: давление акустического контакта $p_{\text{а.к}}$ в зоне соприкосновения волновода с изделием, необходимое для эффективного ввода энергии УЗК в сварочную зону, и статическое сварочное давление $p_{\text{св}}$, обеспечивающее сжатие соединяемых изделий с давлением большим или меньшим, чем $p_{\text{а.к}}$.

На рис. 1 приведена схема УЗС поликарбоната в условиях независимого давления, позволяющая варьировать значение статического сварочного давления $p_{\text{св}}$ с одновременным обеспечением необходимого для протекания сварки давления акустического контакта $p_{\text{а.к}}$ между волноводом и изделием.

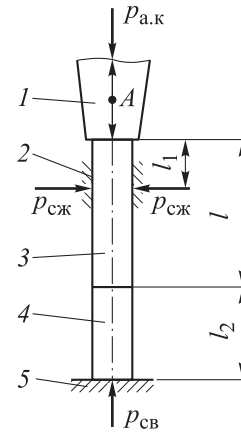


Рис. 1. Схема УЗС поликарбоната в условиях независимого давления:

l и l_2 — длина верхней и нижней свариваемой детали;
 l_1 — расстояние от волновода до промежуточного крепления фиксатора

Верхнюю деталь 3 закрепляют с помощью фиксатора 2 между волноводом 1 и нижней деталью 4. Затем волновод прижимается к детали 3 с давлением акустического контакта $p_{\text{а.к}}$ и находится в этом положении до конца сварки.

Нижняя деталь через опору 5 поджимается к верхней детали. В этом случае зафиксированная фиксатором сжимающими усилиями $P_{\text{сж}}$ верхняя деталь является продолжением акустической системы с волноводом. Фиксатор сжимающими усилиями $P_{\text{сж}}$ располагается на верхней детали на расстоянии от ввода УЗК А, где смещение колебаний равно нулю (узел смещения).

Расстояние l_1 для промежуточного крепления фиксатора, определенное экспериментально, составило для поликарбоната 16 мм. Фиксатор представляет собой рамку, форма которой соответствует форме поперечного сечения стержня, и охватывает стержень в узловых сечениях. При этом обязательным условием успешного протекания процесса сварки является минимальное значение площади плоскости соприкосновения рамки с поверхностью стержня.

Для проведения исследований УЗС в условиях независимого давления на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана спроектировано и изготовлено специальное устройство, позволяющее проводить фиксацию верхней детали в процессе УЗС, а также осуществлять подачу нижней детали в сварочную зону.

Схема устройства для регулирования статического сварочного давления $p_{\text{св}}$ и давления

акустического контакта $p_{а.к}$ приведена на рис. 2.

Устройство позволяет в процессе УЗС контролировать и варьировать скорость перемещения соединяемых деталей относительно друг друга, а также осадку, статическое сварочное давление $p_{св}$ и давление акустического контакта $p_{а.к}$. На начальной стадии УЗС статическое сварочное давление может иметь произвольное значение, но к моменту окончания сварки оно не должно превышать 0,7...0,8 МПа, а давление акустического контакта $p_{а.к} = 1,0...1,5$ МПа.

Эксперимент проводили на универсальной сварочной машине УПМ-21, разработанной на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана и укомплектованной акустической системой с никелевым магнито-стрикционным преобразователем мощностью 1 кВт с частотой 22 кГц. В качестве источника питания последнего использовали ультразвуковой генератор ИЛ 10-1,0, разработанный ООО «Ультразвуковая техника ИНЛАБ» (г. Санкт-Петербург).

Экспериментально установлены следующие параметры режима сварки: амплитуда колеба-

ния рабочего торца волновода $A = 30$ мкм; время сварки $t_{св} = 1,0...1,5$ с; статическое сварочное давление $p_{св} = 0,7...0,8$ МПа; давление акустического контакта $p_{а.к} = 1,5$ МПа; частота УЗК $f = 22$ кГц. Пределы изменения параметров режима ограничивали значениями, при которых образцы разрушались в процессе испытаний на прочность.

Проведенные работы по использованию УЗС в условиях независимого давления позволяют сформулировать следующий механизм образования СС. На начальной стадии процесса верхняя деталь из поликарбоната представляет собой отдельное звено акустической системы, т. е. является ее продолжением. Пропуская УЗК через верхнюю деталь и настраивая всю систему на резонансную частоту, на торце детали получаем амплитуду колебаний волновода, т. е. на данной стадии все частицы торца верхней детали колеблются с определенной частотой и описывают при этом сложную траекторию.

В момент подачи второй детали в зону сварки на границе раздела соединяемых поверхностей колебания вызывают внешнее трение, обусловленное сдвиговыми деформациями на связываемых поверхностях. Совместное действие внешнего трения и энергии УЗК способствует термической активации контактирующих поверхностей, вследствие чего происходит нагрев тонкого поверхностного слоя и появляются очаги схватывания.

Наличие сдвиговых деформаций способствует выравниванию температур в сварочной зоне. Образовавшаяся при этом мягкая прослойка интенсивно поглощает энергию механических УЗК, что приводит к сильному разогреву, а следовательно, к оплавлению свариваемых поверхностей без существенной деформации.

В качестве объекта исследования использовали цилиндрические тонкостенные емкости из поликарбоната, работающие под давлением (рис. 3).

Проведенные эксперименты показали, что УЗС поликарбоната с плоскими поверхностями свариваемых цилиндрических изделий не позволяет получить прочное герметичное соединение по всему их периметру вследствие неравномерного распределения УЗК и больших давлений, приводящих к растрескиванию поликарбоната с образованием многочисленных трещин серебра, получивших такое название из-за серебристого цвета. Серебро вызы-

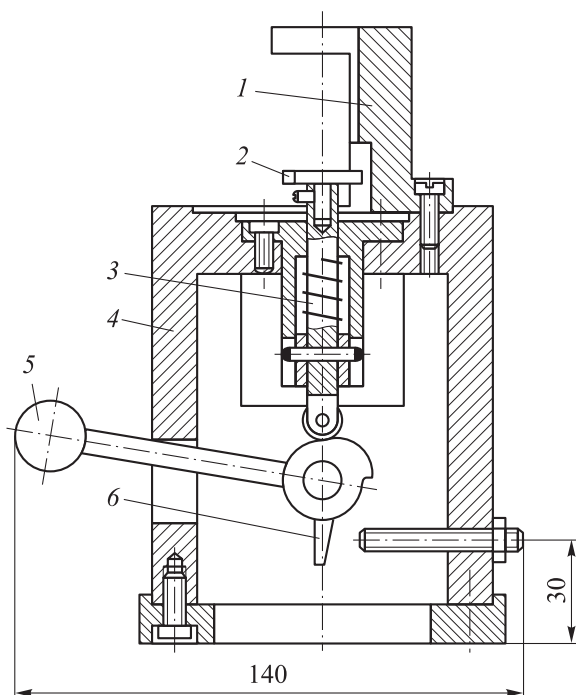


Рис. 2. Схема устройства для регулирования статического сварочного давления и давления акустического контакта при УЗС:

- 1 — фиксатор; 2 — опорный столик;
- 3 — подвижный шток; 4 — корпус устройства;
- 5 — рукоятка; 6 — ограничитель движения

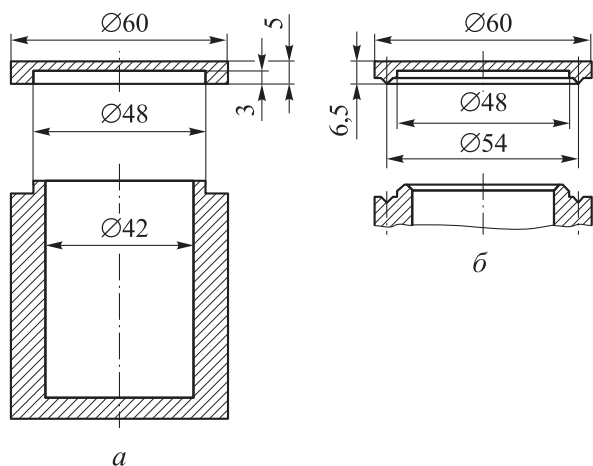


Рис. 3. Схемы стакана и крышки цилиндрической тонкостенной емкости из поликарбоната (а) и V-образной разделки их кромок (б)

вается напряжениями растяжения, которые могут возникнуть как при изготовлении деталей из поликарбоната, так и при их эксплуатации [1, 13].

Для получения трещиностойких СС необходимо, чтобы температура в зоне сварки была близкой к температуре плавления поликарбоната, а деформация должна быть сведена к минимуму [3, 9].

В целях предотвращения указанных недостатков, приводящих к снижению прочности и нарушению герметичности по периметру изделия, предложена конструкция свариваемых поверхностей с V-образной разделкой кромок (рис. 4). Такая конструкция позволяет наиболее целесообразно концентрировать подводимую к сварочной зоне энергию и направлено формировать шов, тем самым уменьшая время УЗС и обеспечивая получение надежного СС с заданными характеристиками.

В процессе исследования установлено, что угол разделки кромок зависит от геометрии свариваемого изделия, а также от теплофизических и реологических свойств полимерного материала. Для емкостей, изготовленных из поликарбоната диаметром 60 мм с толщиной стенки до 9 мм, оптимальное значение V-образного угла разделки кромок находится в пределах 90° и органически связано со скоростью перемещения свариваемых кромок относительно друг друга (см. рис. 3).

Отклонение от оптимальных значений угла разделки кромок приводит к снижению прочности на 25...30%. Уменьшение этого параметра приводит к нарушению герметичности СС

вследствие наличия воздушных полостей в зоне сварки. Увеличение угла разделки кромок затрудняет процесс перемещения одной детали относительно другой, что вызывает местное схватывание соединяемых поверхностей при пропуске УЗК еще до момента достижения крышкой заданного местоположения с корпусом свариваемой емкости.

Увеличения осадки можно добиться путем ускорения перемещения верхней и нижней деталей относительно друг друга. При сварке изделий из поликарбоната следует учитывать, что в первый момент контактирования свариваемых поверхностей крышка должна входить в направляющий конус отверстия цилиндра на 0,1 мм, так как торцевой диаметр крышки меньше внутреннего диаметра цилиндра (см. рис. 3). В противном случае на соединяемых поверхностях могут появляться задиры, что приводит к снижению прочности СС и даже к браку [9, 10].

Как уже отмечалось, определенное влияние на качество СС оказывает скорость перемещения деталей относительно друг друга. При наличии высоких давлений время протекания сварки уменьшается вследствие более быстрого размягчения полимера за счет действия внешнего пограничного трения на связываемых поверхностях.

Однако чрезмерное увеличение скорости перемещения деталей относительно друг друга (более 1,4 мм/с) может привести к снижению прочности и нарушению герметичности СС. Это связано с тем, что при большой скорости перемещения расплав в зоне сварного шва не перемешивается, а следовательно, повышается вероятность появления в сварочной зоне воз-

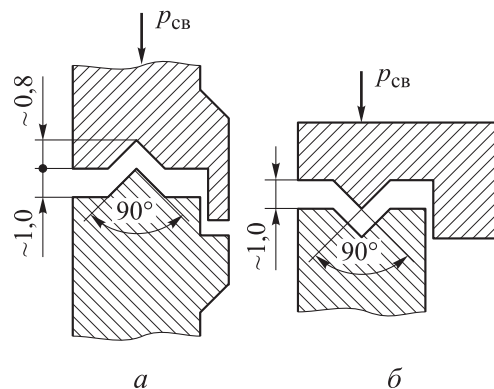


Рис. 4. Схемы свариваемых поверхностей с V-образной разделкой кромок при УЗС поликарбоната с нижним (а) и верхним (б) расположением V-образного выступа

душных пузырей из слоев расплава, значительно различающихся по температуре [3, 5, 13].

При разработке конструкции свариваемых изделий следует избегать местных ослаблений сечений и резких переходов, которые могут привести к разрушению СС при его эксплуатации, а также рассчитывать конусность для сопрягаемых деталей так, чтобы корпус охватываемой детали входил в конус охватываемой.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для получения надежного герметичного соединения необходимо строго соблюдать параметры режима сварки и использовать разработанные технологические приемы.

Качество СС из поликарбоната, выполненных УЗС в условиях независимого давления, можно визуалью оценивать по ширине прозрачного участка зоны сварки. Если между отдельными элементами произошло только частичное оплавление, то прозрачность шва уменьшается в результате преломления и рассеивания луча света на границе воздушных прослоек.

Если материал сварного шва в процессе УЗС был нагрет выше температуры плавления, то прозрачность снижается вследствие наличия в зоне шва продуктов термодеструкции полимера. Экспериментально установлено, что с увеличением ширины прозрачного участка прочность СС повышается.

Проведенные механические испытания сварных изделий круглой формы диаметром 60 мм показали, что прочность СС, выполненных УЗС с учетом разработанных рекомендаций, составила 95 % прочности основного материала. При этом получен равнопрочный и герметичный шов по всему периметру изделия.

Выводы

1. Разработана схема УЗС в условиях независимого давления, позволяющая варьировать давление сварки в зоне полимер — полимер, не принимая во внимание условие, необходимое для создания акустического контакта между волноводом и изделием.

2. Использование УЗС в условиях независимого давления с учетом разработанных технологических приемов, включающих в себя рациональную конструкцию свариваемых поверхностей, позволяет получать равнопрочное и герметичное соединение с высокими эксплуатационными характеристиками.

3. УЗС поликарбоната, осуществляемая в условиях независимого давления, является экономичным процессом, так как благодаря действию внешнего и внутреннего трения суммарная энергия, выделяющаяся в зоне СС на единицу площади, почти в 2 раза больше, чем при сварке традиционными способами и без учета предложенных рекомендаций.

Литература

- [1] Крыжановский В.К., Бурлов В.В. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [2] Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва, Научный мир, 2007. 576 с.
- [3] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [4] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [5] Волков С.С., Неровный В.М., Станкевич И.В. Влияние геометрии поверхности разделки кромок на свариваемость жестких пластмасс. *Сварка и диагностика*, 2018, № 1, с. 11–14.
- [6] Volkov S.S., Orlov Yu.N., Garanin I.N. A magnetoelastic sensor for inspecting the quality of welded joints in ultrasound welding of plastics. *Welding international*, 2001, no. 15(10), pp. 816–820, doi: 10.1080/09507110109549448
- [7] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Heated tool ultrasonic welding of elastic containers produced from fluoroplastic film. *Welding international*, 2016, vol. 30(6), pp. 492–496, doi: 10.1080/09507116.2015.1090180
- [8] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 15–20.
- [9] Волков С.С. Технология ультразвуковой сварки многоэлементных изделий из жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2003, № 10, с. 35–39.

- [10] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Welding International*, 2013, no. 27(9), pp. 720–724, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753281>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Welding international*, 2013, vol. 27(1), pp. 63–66, doi: 10.1080/09507116.2012.695155
- [12] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Welding international*, 2011, vol. 25(11), pp. 898–902, doi: 10.1080/09507116.2011.581433
- [13] Волков С.С., Неровный В.М., Малолетков А.В. Технологические особенности ультразвуковой сварки жестких пластмасс в вакууме. *Сварка и диагностика*, 2015, № 6, с. 29–32.

References

- [1] Kryzhanovskiy V.K., Burlov V.V. *Tekhnicheskiye svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Petersburg, Professiya publ., 2005. 235 p.
- [2] Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchnyy mir publ., 2007. 576 p.
- [3] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Polytech publ., 2013. 646 p.
- [4] Volkov S.S. *Svarka i skleivaniye polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiya publ., 2001. 376 p.
- [5] Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Stankevich I.V. Influence of the geometry of the cutting edge surface on the weldability of rigid plastics. *Welding and diagnostics*, 2018, no. 1, pp. 11–14 (in Russ.).
- [6] Volkov S.S., Orlov Yu.N., Garanin I.N. A magnetoelastic sensor for inspecting the quality of welded joints in ultrasound welding of plastics. *Welding international*, 2001, no. 15(10), pp. 816–820, doi: 10.1080/09507110109549448
- [7] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Heated tool ultrasonic welding of elastic containers produced from fluoroplastic film. *Welding international*, 2016, vol. 30(6), pp. 492–496, doi: 10.1080/09507116.2015.1090180
- [8] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2011, no. 9, pp. 15–20 (in Russ.).
- [9] Volkov S.S. Technology of ultrasonic welding of multi-element products from hard plastics. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2003, no. 10, pp. 35–39 (in Russ.).
- [10] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Welding International*, 2013, no. 27(9), pp. 720–724, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753281>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Welding international*, 2013, vol. 27(1), pp. 63–66, doi: 10.1080/09507116.2012.695155
- [12] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Welding international*, 2011, vol. 25(11), pp. 898–902, doi: 10.1080/09507116.2011.581433
- [13] Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Maloletkov A.V. Technological features of ultrasonic welding of hard plastics in vacuum. *Welding and Diagnostics*, 2015, no. 6, pp. 29–32 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 11.11.2019

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: map@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).

ПАНКРАТОВ Александр Сергеевич — 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: aspankratov@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Ремизов А.Л., Панкратов А.С. Особенности процесса разогрева при ультразвуковой сварке изделий из поликарбоната в условиях независимого давления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 4, с. 54–62, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-54-62

Please cite this article in English as:

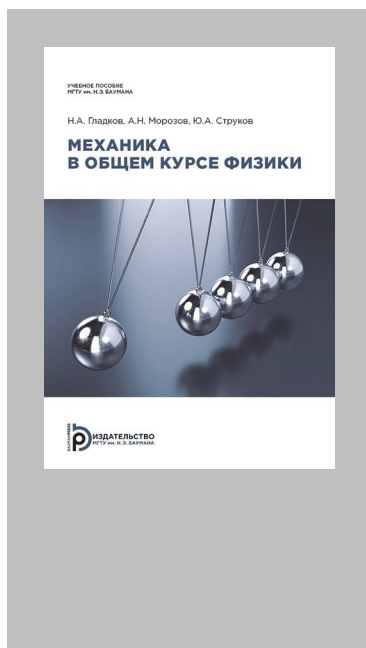
Volkov S.S., Remizov A.L., Pankratov A.S. Features of the Heating Process in Ultrasonic Welding of Polycarbonate Products under Independent Pressure. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 4, pp. 54–62, doi: 10.18698/0536-1044-2020-4-54-62

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: map@bmstu.ru).

REMIZOV Andrey Leonidovich — Candidate of Science (Eng.), Associate 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: remizoff.andrew@mail.ru).

PANKRATOV Aleksandr Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate 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: aspankratov@bmstu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие Н.А. Гладкова, А.Н. Морозова, Ю.А. Струкова «Механика в общем курсе физики»

В издании компактно изложены все темы первого раздела общего курса физики — механики: кинематика точки и твердого тела, динамика поступательного и вращательного движения, работа и энергия, механические колебания и волны, а также специальная теория относительности. Теоретический материал дополнен примерами с решениями.

Содержание пособия соответствует курсу лекций, читаемому авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru