

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2018-1-63-70

# Влияние концентрации тепловой энергии на прочность поверхностей при ультразвуковой сварке пластмасс

С.С. Волков<sup>1</sup>, В.М. Неровный<sup>1</sup>, Л.А. Шестель<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет, 644050, Омск, Российская Федерация, пр-т Мира, д. 11

## The Effect of Thermal Energy Concentration on the Strength of Welded Surfaces in the Ultrasonic Welding of Plastics

S.S. Volkov<sup>1</sup>, V.M. Nerovnyy<sup>1</sup>, L.A. Shestel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

<sup>2</sup> Omsk State Technical University, 644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11



e-mail: map@bmstu.ru, vmn@bmstu.ru, weldtechn@mail.ru



Приведены результаты исследования, позволившие провести оптимизацию разделок стыкуемых кромок в зависимости от технических и эстетических требований к готовой продукции. Для повышения концентрации энергии на свариваемых поверхностях выбрана V-образная форма разделки кромок. Выполнен анализ теплового режима сварки полимеров и кинетики образования сварного соединения. Установлено, что оптимальное значение угла V-образного клина, при котором достигаются максимальная прочность и герметичность соединения, составляет примерно 45°. При сварке деталей из жестких пластмасс их необходимо рассматривать как отдельное звено единой акустической системы преобразователь–волновод–свариваемые детали–опора. Описан механизм образования соединения при ультразвуковой сварке пластмасс. Показано, что выделение тепла на свариваемых поверхностях происходит за счет внутреннего трения. Выявлено, что V-образная разделка кромок деталей приводит к преимущественному теплообразованию на границе раздела, вызываемому повышением уровня динамических напряжений, что способствует ускорению процесса ультразвуковой сварки пластмасс. Разделка кромок увеличивает прочность создаваемого соединения, улучшает его внешний вид и сокращает время ультразвуковой сварки.

**Ключевые слова:** ультразвуковая сварка, амплитуда колебаний волновода, статическое сварочное давление, коэффициент концентрации, удельная мощность, динамические напряжения



The article presents the results of a study to optimize edge preparation in order to meet technical and aesthetic requirements to the finished product. To increase energy concentration on the butting welded surfaces, V-shaped edge preparation is selected. An analysis of the thermal regime of polymer welding and the kinetics of weld joint formation is performed. It is established that the optimal value of the V-groove lies in range of 45 degrees, at which the maximal strength and tightness of the weld joint are reached. When welding parts made of rigid plastics, it is necessary to consider them as a separate element in

the single acoustic system transducer–sonotrode–welding parts–anvil. The mechanism of weld joint formation during ultrasonic welding of plastics is described. It is shown that thermal emission on welding surfaces is due to internal friction. It is established that the V-shaped edge preparation leads to predominant heat formation at the boundary and is caused by an increasing level of dynamic stresses, which contributes to the acceleration of the ultrasonic welding process. Edge preparation increases the strength of the weld joint, improves its appearance and reduces the time of ultrasonic welding.

**Keywords:** ultrasonic welding, sonotrode vibration amplitude, static welding pressure, concentration coefficient, specific power value, dynamic stresses

При производстве изделий и конструкций ответственного назначения широко применяют жесткие пластмассы: полистирол, АБС-пластики, полиметилметакрилат и др. Разнообразие форм и размеров стыкуемых деталей требует совершенствования существующих и разработки новых способов сварки для получения соединений с большим запасом работоспособности. Одним из наиболее перспективных способов соединения полимерных материалов является ультразвуковая сварка (УЗС).

Сущность УЗС пластмасс заключается в том, что электрические колебания ультразвуковой частоты (18...20 кГц), вырабатываемые генератором, преобразуются в механические продольные колебания магнитострикционного преобразователя и вводятся в свариваемый ма-

териал с помощью продольно-колеблющегося волновода-инструмента (далее волновода), расположенного перпендикулярно к свариваемым поверхностям. Часть энергии механических ультразвуковых колебаний переходит в тепловую, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых поверхностей до температуры вязкотекучего состояния. Надлежащие условия ввода механических колебаний и создание тесного контакта обеспечиваются статическим сварочным давлением  $p_{ст}$  рабочего торца волновода на свариваемые детали (рис. 1).

Особенностью УЗС пластмасс является то, что механические ультразвуковые колебания вводятся перпендикулярно соединяемым поверхностям и совпадают с направлением приложения статического сварочного давления. Также УЗС значительно отличается от других способов сварки по физико-химическим процессам, протекающим на границе раздела свариваемых поверхностей. Во-первых, воздействие колебаний на расплав полимера существенно ускоряет процесс диффузии макромолекул. Во-вторых, при УЗС происходит интенсивное перемешивание расплава, вызванное «насосным действием» движущегося торца волновода. Благодаря этому в область разрежения, образующуюся на границе раздела свариваемых поверхностей, притекают новые частицы полимера, которые вовлекаются в движение при следующем перемещении поверхности волновода вперед. Это ускоряет процесс образования соединений и обеспечивает возможность качественной сварки при температуре более низкой, чем в других известных способах, а иногда даже меньше температуры текучести полимеров [1].

При УЗС зоне максимального тепловыделения соответствует область максимальных динамических напряжений (деформаций). С этой позиции преимущественный разогрев границы раздела свариваемых поверхностей пластмасс можно объяснить тем, что соединяемые детали контактируют по микронеровностям, которые

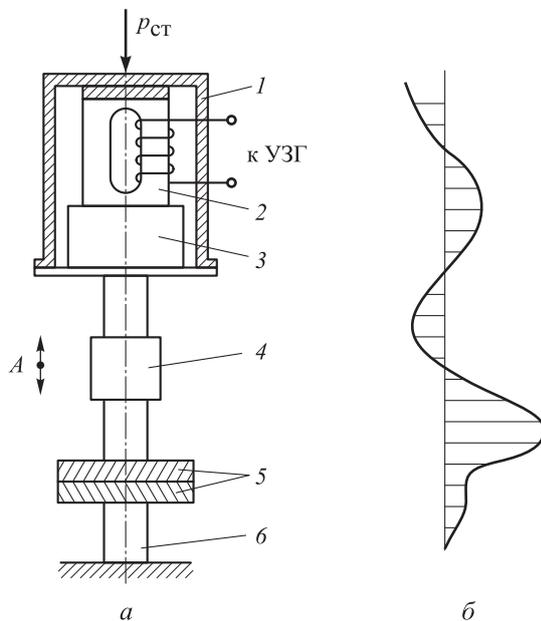


Рис. 1. Принципиальная схема установки УЗС с нормальным вводом колебаний (а) и эпюра амплитуды смещения колебательной системы (б): 1 — корпус преобразователя с охлаждающей жидкостью; 2 — магнитострикционный преобразователь с обмоткой; 3 — трансформатор упругих колебаний; 4 — волновод; 5 — свариваемые детали; 6 — опора; А — амплитуда колебаний волновода; УЗГ — ультразвуковой генератор

не сминаются при приложении статического сварочного давления [2].

Так как реальная площадь контакта мала, на границе раздела стыкуемых поверхностей возникают значительные динамические напряжения. Поскольку скорость нагрева пропорциональна амплитуде динамических напряжений, происходит преимущественный разогрев микронеровностей, их оплавление, растекание полимера под действием статического сварочного давления по поверхности раздела деталей и образование сварного соединения [3, 4]. Очевидно, что в этом случае граница раздела связываемых поверхностей оказывается в благоприятных условиях вследствие естественного уменьшения реальной площади контакта. Таким образом, прочность соединения возрастает с увеличением шероховатости. Повысить уровень динамических напряжений на границе раздела стыкуемых поверхностей можно искусственным уменьшением площади контакта за счет специальной разделки кромок деталей.

Цель работы — исследование напряжений и характера их распределения в свариваемых деталях с V-образной разделкой кромок, а также определение взаимосвязи между деформацией материала, прочностью создаваемых соединений и температурой в зоне УЗС и под волноводом.

Коэффициентом концентрации тепловой энергии  $K_k$  в зоне УЗС назовем отношение удельной мощности, выделяющейся в свариваемых изделиях с разделкой кромок, к удельной мощности, выделяющейся в детали без разделки кромок. После приложения статического сварочного давления происходит некоторое смятие выступа, в результате чего образуется площадка контакта  $S_k = S_2$  (рис. 2).

Для изображенной на рис. 2 V-образной разделки кромок эти величины, в свою очередь, являются функциями угла клина  $\gamma$  и давления  $p_{ст}$ . Рост давления приводит к увеличению площадки контакта  $S_2 = S_k$  и уменьшению высоты выступа  $l_2$ . Так как коэффициент тепловой концентрации энергии уменьшается с ростом  $S_2$  и  $l_2$ ,  $K_k$  должен быть связан со статическим сварочным давлением и углом клина. В работах [2, 3] установлено, что контактная площадка линейно увеличивается с повышением  $p_{ст}$ .

Коэффициент концентрации тепловой энергии в зоне УЗС зависит от угла  $\gamma$  при вершине V-образного выступа и статического сварочного давления. Оптимальным для всех видов пластмасс следует считать угол  $\gamma = 45^\circ$ , так как

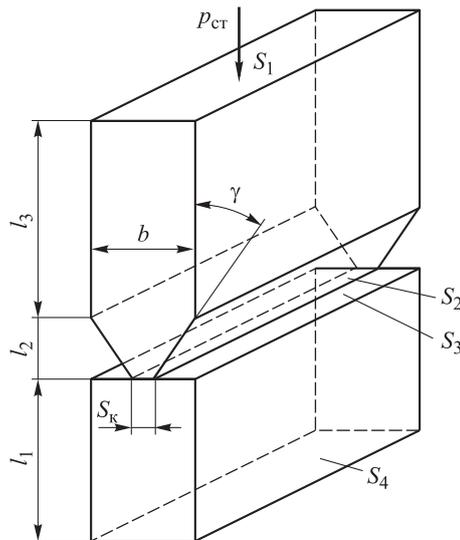


Рис. 2. Составная система с V-образной разделкой кромок при стыковой передаточной УЗС:  $\gamma$  — угол скоса кромок (угол клина);  $S_1$ – $S_4$  — площади поперечного сечения;  $S_k$  — площадь контакта;  $b$  — толщина детали;  $l_1, l_2, l_3$  — длины стержней

при этом обеспечиваются минимальная площадь контакта  $S_k$  и максимальный уровень динамических напряжений, т. е. максимальное тепловыделение в зоне УЗС.

Уменьшение коэффициента  $K_k$  при увеличении статического сварочного давления  $p_{ст}$  связано с увеличением контактной площади между V-образным выступом и нижней деталью.

Исследуем УЗС протяженных деталей, когда невозможно пренебречь волновыми процессами. В этом случае соединяемые детали следует рассматривать как отдельное звено единой акустической системы преобразователь — волновод — свариваемые детали — опора, в котором распределение характеристик ультразвукового поля определяется геометрическими размерами и физическими свойствами материала деталей [1–3].

Представим свариваемые детали как составную систему из однородных стержней (см. рис. 2). На входе в первый стержень система соединена с рабочим торцом волновода, а на выходе последнего звена — с опорой. Задача заключается в том, чтобы найти такое соотношение геометрических размеров стержней, при котором выполняются следующие два условия оптимальности. Первое — пучность амплитуды колебаний волновода расположена на входе в стержневую систему, что соответствует экспериментальным данным и оговаривается практически всеми исследователями [1, 3]. Второе

условие — пучность динамических напряжений находится в плоскости контакта свариваемых деталей. Это условие основано на данных работ [3, 5], согласно которым преимущественный разогрев протекает в зонах максимальных динамических напряжений [4].

Первое условие оптимальности наиболее просто выполняется, если каждое звено системы преобразователь–волновод–свариваемые детали–опора настроено в резонанс и на стыках этих звеньев имеет место максимальное отражение ультразвуковой энергии. Тогда детали находятся в режиме, не зависящем от предыдущих звеньев, и в каждом звене будет наблюдаться чисто стоячая волна [5, 6]. Это справедливо при отсутствии потерь в звеньях акустической системы. Так как даже при наличии существенных потерь в области резонансных значений частоты входное сопротивление системы меняется относительно медленно, резонансные размеры деталей можно определять (с достаточной для практических целей точностью) по формулам для идеальных систем без потерь [7, 8].

В дальнейшем будем рассматривать сварку на активной опоре (толстой металлической плите, представляющей собой четвертьволновый металлический стержень). В этом случае можно полагать, что стержневая система закреплена на конце, связанном с опорой. Обозначим сдвиг пучности силы относительно конца верхнего стержня длиной  $l_3$  (см. рис. 2) через  $x_{01}$ . Поскольку пучность амплитуды колебаний сдвинута относительно пучности силы на величину  $(2n+1)\lambda_1/4$  (где  $\lambda_1$  — длина волны, распространяющейся в материале первого стержня), для выполнения первого условия оптимальности необходимо, чтобы

$$l_3 = (2n+1)\frac{\lambda_1}{4} + x_{01}. \quad (1)$$

В общем случае сварки трех стержней длиной  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  (см. рис. 2) величину  $x_{01}$  определяют из выражения

$$x_{01} = \frac{\lambda_1}{2\pi} \times \arctg \frac{W_{01}}{-W_{02} \operatorname{ctg} \left( \frac{2\pi}{\lambda_2} l_2 - \operatorname{arctg} \frac{W_{02}}{-W_{03} \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda_3} l_3} \right)}. \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  — длина волны, распространяющаяся в материале второго и третьего стержня;  $W_{01}$ ,  $W_{02}$  и  $W_{03}$  — волновое сопротивление соответственно первого, второго и третьего стержней, определяемое по формуле

$$W_{0i} = S_i \sqrt{E_i \rho_i},$$

где  $i$  — номер стержня;  $S_i$ ,  $E_i$  и  $\rho_i$  — соответственно площадь поперечного сечения, модуль упругости и плотность материала  $i$ -го стержня.

Рассмотрим несколько важных для практики частных случаев.

**Стыковая сварка двух стержней.** В этом случае  $l_1 = 0$  и из второго условия оптимальности  $x_{01} = 0$ . С учетом этого из выражений (1) и (2) найдем

$$l_3 = (2n+1)\frac{\lambda_1}{4}; \quad l_2 = k\frac{\lambda_2}{4} \quad (k, n = 0, 1, 2, \dots). \quad (3)$$

Следует отметить, что если стержни поменять местами, т. е. принять  $l_2 = (2n+1)\lambda_1/4$  и  $l_3 = k\lambda_2/4$ , то сварка может не произойти. При этом, хотя система и будет настроена в резонанс, граница раздела деталей совпадает с узлом силы, поэтому преимущественный разогрев будет происходить в средней зоне верхнего стержня, где расположена пучность силы [4, 9].

**Стыковая сварка стержней с разделкой кромок.** Средний стержень представляет собой V-образный клин или конус, служащий для концентрации динамических напряжений. Так как  $l_2 \ll \lambda_2/4$ , можно принять, что площадь поперечного сечения этого участка не изменится и равна площади контакта  $S_k$  клина с нижней деталью, т. е.  $S_2 = S_k$ . Для выполнения второго условия оптимальности необходимо, чтобы  $x_{02} = 0$  ( $x_{02}$  — смещение пучности силы относительно конца участка длиной  $l_2$ ). Очевидно, что значение  $x_{02}$  получим, если в выражении (2) принять  $l_1 = 0$  и индекс «1» поменять на «2», а индекс «2» — на «3». Тогда имеем

$$l_3 = k\frac{\lambda_3}{4}, \quad (4)$$

и, подставив выражение (4) в формулы (1) и (2), для  $l_2 \gg \lambda_2/4$  найдем оптимальную длину верхнего стержня

$$l_3 = (2n+1)\frac{\lambda_1}{4} + \frac{\lambda_1}{2\pi} \operatorname{arctg} \left( -2\pi \frac{l_2 W_{01}}{\lambda_2 W_{02}} \right).$$

**Сварка тавровых соединений.** Если в выражении (4)  $k \rightarrow 0$ , т. е. толщина нижней пластины незначительна, то приходим к случаю сварки тавровых соединений. При этом второе условие оптимальности будет выполняться тем лучше, чем меньше контактная площадь  $S_2 = S_k$ . Поскольку  $l_2 \ll \lambda_2/4$  и  $l_1 < \lambda_1/4$ , из выражения (2), принимая, что стержни выполнены из одного материала, после упрощения получим

$$l_3 = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[ -\frac{2\pi}{\lambda} l_1 \left( \frac{S_1 l_2}{S_2 l_1} + 1 \right) \right]. \quad (5)$$

Как следует из выражений (4) и (5), оптимальные длины стержней в значительной степени зависят от контактной площади  $S_2$  и высоты выступа после смятия  $l_2$ , которые, в свою очередь, являются функциями угла  $\gamma$  и давления  $p_{ст}$  и определяются по выражениям (4) и (5) и по предварительно экспериментально найденным зависимостям  $S_k = f(\gamma, p_{ст})$  и  $l_2 = f(\gamma, p_{ст})$ . Из этих данных следует, что основное влияние на оптимальную длину верхнего стержня оказывает угол  $\gamma$ . Если  $\gamma \leq 45^\circ$ , то оптимальные значения длины  $l_3$  для стыковой сварки стержней с разделкой кромок и сварки тавровых соединений практически совпадают, близки к  $k\lambda/2$  и мало изменяются с изменением угла. Дальнейший рост  $\gamma$  приводит к необходимости увеличения длины  $l_3$  до  $(2n + 1)\lambda/4$ . Очевидно, что в области  $\gamma \geq 45^\circ$  важное значение имеет точность подготовки деталей под сварку. Действительно, небольшая погрешность при скашивании кромок может привести к затруднениям при сварке из-за того, что длина детали не будет соответствовать условиям оптимальности. Наиболее приемлемыми следует считать углы  $\gamma \approx 45^\circ$ .

Кроме того, нужно учитывать, что приведенные выше выражения справедливы только в самом начале сварки. К концу процесса, когда средний стержень, представляющий собой V-образный клин, переходит в размягченное состояние, колебания стержня длиной  $l_3$  все более соответствуют колебаниям стержня, свободного на концах. В этом случае для выполнения первого условия оптимальности необходимо, чтобы

$$l_3 = k \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$

В противном случае амплитуда колебаний на входе в систему будет уменьшаться по мере

разогрева и повышения податливости V-образного клина, а динамические силы — увеличиваться. Это, в свою очередь, приведет к разогреву стержня непосредственно под волноводом, внедрению последнего в стержень под действием статического давления, и процесс образования сварного соединения останется незавершенным независимо от схемы дозирования ультразвуковой энергии. Условие (6) наиболее полно выполняется при  $\gamma \leq 45^\circ$ , следовательно, и в данном случае эти углы следует считать наиболее приемлемыми.

Из изложенного выше следует очень важное преимущество УЗС с разделкой кромок. При сварке без разделки кромок невозможно выполнить одновременно условия (3) и (6), так как они противоположны. Значит, даже если в начале процесса будут обеспечены оба условия оптимальности, к его концу следует ожидать разогрева верхней детали под волноводом и образования вмятин при внедрении последнего в деталь. Это довольно часто наблюдается на практике, особенно если сварка проводится не слишком интенсивно. Кроме того, сварка с разделкой кромок благодаря возможности создания в зоне контакта деталей максимальных динамических напряжений при уменьшении площади контакта до минимума более стабильно обеспечивает первое условие оптимальности [1, 10].

Таким образом, успешное протекание сварки обусловлено конкуренцией двух процессов: 1) тепловыделения в контакте деталей вследствие концентрации в этой зоне динамических напряжений, обусловленной значительным снижением контактной площади; 2) тепловыделения в контакте волновод–деталь за счет

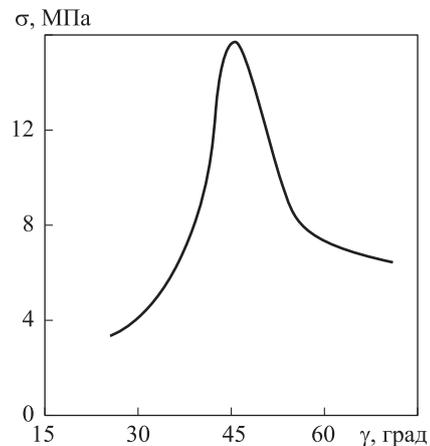


Рис. 3. Зависимость прочности тавровых соединений из полистирола на отрыв  $\sigma$  от угла κ при  $l_3 = 60$  мм

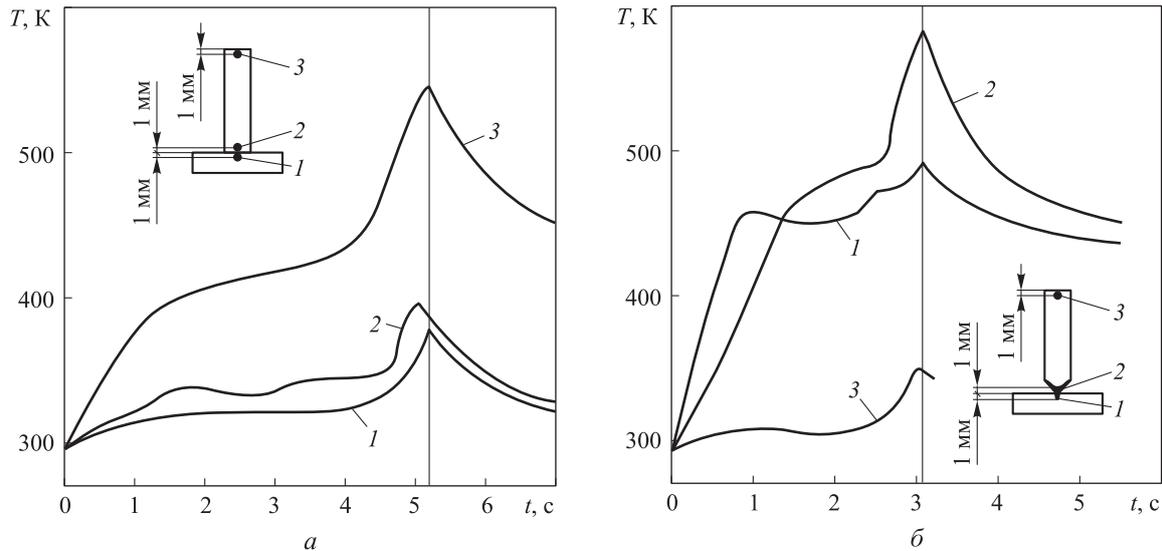


Рис. 4. Термические циклы при сварке тавровых соединений из жестких пластмасс с плоским (а) и V-образным (б) торцами:  
1–3 — термопары

увеличения в этой зоне амплитуды динамической силы, если  $l_3$  значительно отклоняется от  $\lambda/2$ . Чем больше второй процесс преобладает над первым, тем меньше прочность соединения независимо от способа дозирования ультразвуковой энергии.

Это хорошо подтверждается данными, приведенными на рис. 3, где показана зависимость прочности тавровых соединений из полистирола на отрыв от угла  $\gamma$  при  $l_3 = 60$  мм. Так как эта длина не соответствует условиям оптимальности, в зоне контакта волновод — деталь развиваются динамические силы тем больше, чем меньше угол  $\gamma$ . Тем не менее максимальная прочность соответствует углу  $\gamma = 45^\circ$ , что объясняется преимущественным тепловыделением на границе контакта деталей вследствие концентрации динамических напряжений [4, 10].

Например, при сварке тавровых соединений из полистирола (размеры полки и стенки соответственно  $15 \times 15 \times 6$  и  $60 \times 15 \times 6$  мм) на активной опоре наблюдалось оплавление торца стенки, прилегающего к рабочему торцу волновода, без образования сварного соединения.

Термографирование (рис. 4, а) показало, что в этом случае наибольшие температуры развивались непосредственно под волноводом, в то время как в области границы раздела свариваемых поверхностей наблюдалось низкотемпературное равновесие. Применение V-образной разделки кромок торца стенки, соприкасающегося с границей раздела, позволило сдвинуть область преимущественного разогре-

ва к этой границе (рис. 4, б). Сначала происходит интенсивный разогрев области границы раздела со стороны полки тавра до температуры вязкотекучего состояния, что сопровождается внедрением стенки в полку под действием статического давления. Затем преимущественный разогрев протекает в V-образном выступе, что приводит к его оплавлению и осадке.

Максимумы и минимумы температуры  $T$  в зоне сварки хорошо совпадают с оптимальными  $l_{\text{опт}}$  и критическими значениями верхнего стержня  $l_3$ . Однако их значения снижаются с отклонением от  $l_{\text{опт}}$  в меньшей степени, чем амплитуда колебаний волноводной системы. Это подтверждает сделанное ранее предположение о преобладающей роли концентрации напряжений в образовании сварных соединений высокой прочности.

## Выводы

1. При сварке деталей из жестких пластмасс последние необходимо рассматривать как отдельное звено акустической системы преобразователь–волновод–свариваемые детали–опора. Геометрические размеры деталей могут быть определены из условий работы этого звена в резонансном режиме стоячей волны, когда на входе в систему имеется пучность амплитуды смещения (первое условие оптимальности) и совпадают границы раздела деталей с пучностью динамических напряжений (второе условие оптимальности).

2. При сварке с разделкой кромок длина верхней детали в основном зависит от угла разделки V-образного клина, оптимальное значение которого лежит в области 45°. Это в основном обусловлено концентрацией напряжений в зоне контакта деталей, что допускает возможность отклонения от первого условия оптимальности.

3. Получены аналитические выражения для определения оптимальных геометрических размеров деталей из жестких пластмасс, при которых достигаются самая высокая прочность и наиболее интенсивное тепловыделение в зоне УЗС.

## Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С. Технология ультразвуковой сварки многоэлементных изделий из жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2003, № 10, с. 35–39.
- [3] Волков С.С. Распределение мощности в ультразвуковой сварочной системе при сварке полимерных пленок. *Сварочное производство*, 2012, № 10, с. 42–46.
- [4] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [5] 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.
- [6] Volkov S.S. Technology for ultrasonic welding multi-element components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, no. 18(3), pp. 242–245.
- [7] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Welding International*, 2008, no. 22(3), pp. 193–197.
- [8] Volkov S.S. Effect of fillers and dyes on weldability and service properties of ultrasound-welded joints in plastics. *Welding International*, 2010, no. 24(9), pp. 734–737.
- [9] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799.
- [10] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2013, vol. 27(3), pp. 63–66.

## References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiia publ., 2001. 376 p.
- [2] Volkov S.S. Tekhnologiya ul'trazvukovoi svarki mnogoelementnykh izdelii iz zhestkikh plastmass [The technology of ultrasonic welding of multi-element products of rigid plastics]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2003, no. 10, pp. 35–39.
- [3] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799.
- [4] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Politekhnikeskoi universitet publ., 2013. 646 p.
- [5] Volkov S.S., Nerovnyi V.M., Maloletkov A.V. Tekhnologicheskie osobennosti ul'trazvukovoi svarki zhestkikh plastmass v vakuume [Technological features of ultrasonic welding of rigid plastics in a vacuum]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2015, no. 6, pp. 29–32.
- [6] Volkov S.S. Technology for ultrasonic welding multi-element components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, no. 18(3), pp. 242–245.
- [7] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Welding International*, 2008, no. 22(3), pp. 193–197.
- [8] Volkov S.S. Effect of fillers and dyes on weldability and service properties of ultrasound-welded joints in plastics. *Welding International*, 2010, no. 24(9), pp. 734–737.
- [9] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799.
- [10] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2013, vol. 27(3), pp. 63–66.

## Информация об авторах

**ВОЛКОВ Станислав Степанович** (Москва) — 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).

**НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович** (Москва) — 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).

**ШЕСТЕЛЬ Леонид Александрович** (Омск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр-т Мира, д. 11, e-mail: weldtech@mail.ru).

## Information about the authors

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

**NEROVNYY Vyacheslav Mikhailovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vmn@bmstu.ru).

**SHESTEL Leonid Aleksandrovich** (Omsk) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Equipment and Technology of Welding Production. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: weldtech@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышел в свет учебник  
**Н.П. Деменкова, Е.А. Микрина**

### «Управление в технических системах»

Изложена теория автоматического управления в применении к техническим системам. Рассмотрены характерные особенности систем управления, их математическое описание, синтез корректирующих устройств, а также проектирование оптимальных и адаптивных систем управления.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Управление в технических системах» и изучающих дисциплины «Основы теории управления», «Теория автоматического управления», «Управление в технических системах», «Основы автоматики и системы автоматического управления» и др.

Учебник может быть полезен для инженерно-технических работников предприятий, проектных организаций и институтов, занимающихся вопросами автоматизации и управления производственными процессами и техническими объектами.

**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