

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-27-34

Особенности теплообразования при ультразвуковой сварке жестких пластмасс

С.С. Волков, С.А. Королев, Д.С. Розанов

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

The Specific Features of Heat Generation in Ultrasonic Welding of Rigid Plastics

S.S. Volkov, S.A. Korolev, D.S. Rozanov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: ssv@bmstu.ru, korolevsa@bmstu.ru, rozanovds@rambler.ru



Рассмотрены особенности ультразвуковой сварки (УЗС) изделий из жестких пластмасс. Представлены результаты их свариваемости ультразвуком. Описана сущность технологического процесса контактной и передаточной сварки пластмасс. УЗС осуществляется за счет тепла без разогрева всей толщины материала, что позволяет получать сварные соединения большой толщины. Приведены термические циклы УЗС полистирола, а также механизм образования сварного соединения при УЗС пластмасс. Показано, что выделение тепла на обрабатываемых поверхностях происходит в результате внутреннего трения. Для повышения концентрации энергии на стыкуемых поверхностях выбрана V-образная форма разделки кромок. Проведен анализ теплового режима УЗС жестких полимеров и кинетики образования сварного соединения. Установлено, что V-образная разделка кромок деталей приводит к преимущественному теплообразованию на границе раздела, вызываемому повышением уровня динамических напряжений, что способствует ускорению процесса УЗС. Разделка кромок повышает прочность создаваемого соединения, улучшает его внешний вид и сокращает время УЗС. Выведено уравнение, позволяющее рассчитывать время плавления V-образного выступа, с помощью которого установлено, что максимальное выделение ультразвуковой энергии соответствует резонансному режиму работы сварочного узла.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, сварочное статическое давление, ультразвуковая частота, амплитуда колебаний волновода, температура плавления кристаллов, жесткие пластмассы.



The specific features of ultrasonic welding of rigid plastics are considered in this paper. The results of plastic weldability by ultrasound are shown. The core principles of contact and transfer ultrasonic welding are described. Ultrasonic welding is performed by heat, without heating up the entire thickness of the material, which enables welds of large thickness. The paper describes the thermal cycles of ultrasonic welding of polystyrene and the mechanism of welded joint formation when welding plastics by ultrasound. It is shown that heat on the welded surfaces is released due to internal friction. To increase the concentration of energy on the abutting surfaces, the welding groove is beveled to a V-shape. The thermal conditions of welding rigid polymers and the kinetics of the welded joint formation are analyzed. It has been established that V-shaped beveling leads to predominant heat buildup at the interface. This is caused by an increase in the level of dynamic stress, which contributes to the acceleration of the ultrasonic welding process. Beveling increases the welded joint strength, improves its appearance and reduces welding time. As a result, an equation is derived that allows the

calculation of the melting time of the V-shaped groove. It is concluded that the maximum release of the ultrasonic energy corresponds to the resonant mode of operation of the welded assembly.

Keywords: ultrasonic welding, static welding pressure, ultrasonic frequency, amplitude of waveguide oscillations, crystal melting temperature, rigid plastics.

При изготовлении изделий и конструкций из полимерных материалов (ПМ) применяют различные методы соединения, среди которых самой высокопроизводительной и перспективной является ультразвуковая сварка (УЗС). К основным признакам УЗС относятся подвод энергии механических колебаний к свариваемому изделию, передача и концентрация ее в зоне сварки, дозирование подводимой энергии, взаимное перемещение сварочного инструмента и соединяемых деталей [1].

Подвод механической энергии ультразвуковых колебаний осуществляется путем контакта излучающей поверхности сварочного волновода-инструмента с соединяемыми деталями. По характеру передачи энергии к границе раздела свариваемых кромок и распределению ее относительно обрабатываемых поверхностей УЗС можно условно подразделить на контактную и передаточную. Первый метод обычно применяют для нахлесточных соединений пластмасс толщиной от 0,02 до 6,00 мм (полиэтилена, полипропилена, синтетических тканей, ПВХ и др.), второй — для нахлесточных, стыковых и тавровых соединений объемных деталей из жестких пластмасс (полистирола, сополимера стирола, АБС-пластика, полиамида, винилпласта, поликарбоната и др.), которые можно сваривать также контактной УЗС [1, 2].

УЗС позволяет значительно сократить время, необходимое для получения неразъемного соединения, и отказаться от использования вредных для здоровья человека клеев. Этот метод широко применяется при изготовлении литейных форм, украшений, игрушек, канцелярских принадлежностей, сумок и спортивных товаров [3–5].

Цель работы — выявить причины снижения прочности стыковых соединений жестких пластмасс и разработать рекомендации по выбору разделки кромок для максимальной концентрации энергии, что способствует равномерному распределению температур по сварному шву.

Чтобы обеспечить процесс УЗС, материал в зоне сварки должен быть в состоянии высоковязкой жидкости. Однако на начальной стадии

различные ПМ, например жесткие и мягкие, находятся в неодинаковом физическом состоянии. Поэтому предлагается разделить процесс УЗС на три стадии, соответствующие стеклообразному, высокоэластичному и вязкотекучему состояниям пластмасс. На первой стадии выделение теплоты обусловлено внешним трением, разогревом границ раздела (в зоне наибольшего скопления пустот и несплошностей) и циклическим деформированием микровыступов, по которым контактируют поверхности свариваемых деталей. На второй стадии, когда облегчена сегментальная подвижность, тепловыделение вызвано изменением конформаций молекул вследствие циклического деформирования. Третья стадия характеризуется процессами течения расплава, диффузии и перемешивания как отдельных сегментов, так и блоков макромолекул полимеров [1, 6].

Вопрос о характере преобразования энергии ультразвуковых колебаний в тепловую и разогрев вследствие этого свариваемых деталей является едва ли не самым важным, так как с ним связаны не только понимание физических основ УЗС, но и разработка методов практического расчета параметров режима сварки [6, 7]. Все явления, протекающие при УЗС, обусловлены процессом деформации термопластичной среды с ультразвуковой частотой.

Анализ работ [1–4], посвященных теоретическому изучению теплообразования при УЗС, показал, что все исследователи уделяют основное внимание процессам, происходящим на границе раздела свариваемых ПМ, считая, что в этой зоне развивается наибольшая температура.

Можно предположить, что при УЗС жестких пластмасс соединяемые детали контактируют по микронеровностям, которые не сминаются при приложении сварочного статического давления вследствие большого модуля упругости этих ПМ. Реальная площадь контакта мала, поэтому на границе раздела деталей возникают значительные динамические напряжения. А поскольку скорость достижения критической температуры пропорциональна амплитуде этих напряжений, происходят преимущественный разогрев

и оплавление микронеровностей, растекание полимера под действием статического давления по поверхности раздела деталей и образование соединения. Очевидно, что в этом случае граница раздела оказывается в благоприятных условиях вследствие естественного снижения реальной площади контакта. Таким образом, прочность получаемого соединения возрастает с увеличением шероховатости [1, 8].

Повышения уровня динамических напряжений на границе раздела можно достичь искусственным уменьшением площади контакта путем специальной разделки кромок обрабатываемых деталей. Это позволяет сдвигать зону преимущественного разогрева в необходимое сечение [1, 2, 9].

Получить сварные соединения при УЗС пластмасс иногда можно только с разделкой кромок. Так, при сварке тавровых и стыковых образцов без разделки зона максимального развития температур находилась в области, прилегающей к волноводу из-за чего соединение не образовывалось. Разделка же кромок приводила к смещению максимума температур к границе раздела и гарантировала получение сварного соединения.

На рис. 1 приведены термограммы, снятые при УЗС образцов из блочного полистирола (который относится к легкосвариваемым ПМ), которые иллюстрируют влияние V-образной разделки на скорость достижения максимальных температур. Амплитуда колебаний волновода $A = 30$ мкм, статическое сварочное давление $p_{ст} = 5$ МПа. Как видно из термограмм, максимальные температуры в зоне границы раздела образцов с V-образной разделкой кромок по всей поверхности достигались за 0,75 с, а без их разделки — за 1,5 с. Таким образом, даже у легкосвариваемых пластмасс наличие разделки кромок уменьшает время УЗС в 2 раза [1–3].

Термографирование показало, что при отсутствии разделки кромок (рис. 1, б, слева) максимальные температуры развивались непосредственно под волноводом, в то время как в области границы раздела возникало низкотемпературное равновесие. Применение V-образной разделки кромок торца стенки, соприкасающегося с границей раздела, позволило сдвинуть область преимущественного разогрева к этой границе (рис. 1, б, справа). Поэтому сначала происходит интенсивный разогрев области границы раздела со стороны полки тавра вплоть до температуры вязкотекучего состоя-

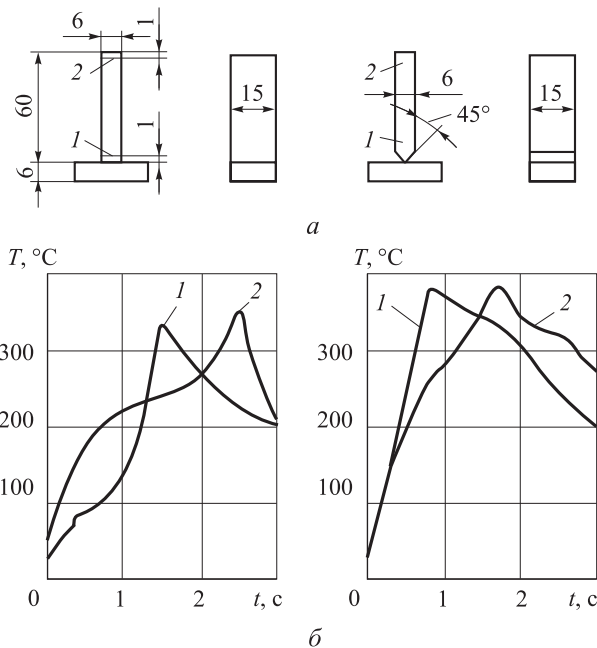


Рис. 1. Схемы соединения (а) и термические циклы сварки (б) образцов из блочного полистирола при отсутствии (слева) и наличии (справа) V-образной разделки кромок по всей поверхности: 1, 2 — места расположения термопар для замера температур T

ния, что сопровождается внедрением стенки в полку под действием статического давления. Затем осуществляется преимущественный разогрев в V-образном выступе, что приводит к его оплавлению и осадке.

Анализ термических циклов УЗС образцов из жестких термопластов показал, что наличие разделки их кромок оказывает существенное влияние и на кинетику образования соединений. В работе [1] отмечено, что при сварке изделий с V-образной разделкой кромок соединения в основном создаются по двум схемам: «с преимущественным внедрением» одной из деталей в другую, если глубина внедрения больше или равна четверти толщины нижней детали, или «с преимущественным оплавлением» острия разделки. Образец считался оплавленным, если глубина внедрения была меньше четверти толщины нижней полки.

Кинетический механизм образования соединений «с преимущественным внедрением» состоит из трех стадий. На первой ($t < 1$ с) никаких видимых изменений не наблюдается (рис. 2, а, з). На второй начинается незначительное расплавление острия разделки и лежащей под ним поверхности нижнего образца (рис. 2, б, з). При этом острие приобретает

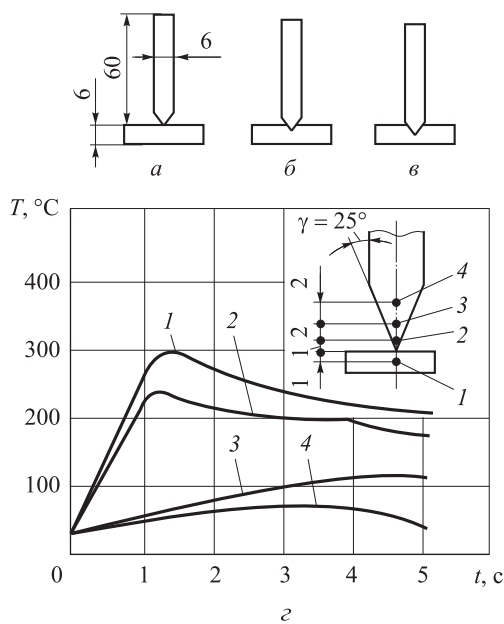


Рис. 2. Кинетический механизм образования соединения по схеме «с преимущественным внедрением» (материал — полистирол, $A = 30$ мкм, $p_{ст} = 3$ МПа):
1-4 — места расположения термопар

округлую форму и незначительно внедряется в полку. Конец этой стадии обычно соответствует схватыванию стенки с полкой, а возникающие температуры примерно одинаковы. На последней стадии (рис. 2, в, з) происходит внедрение стенки в полку, причем температура первого элемента примерно на 50 °С ниже, чем у второго. Глубина внедрения в зависимости от режима колеблется от $1,5$ до 4 мм, а в отдельных случаях ее значение настолько велико, что в полке возникают трещины.

Глубину внедрения можно значительно увеличить путем предварительного подогрева нижней детали, так как при этом уменьшается ее сопротивление пластическим деформациям [6].

В соединениях «с преимущественным оплавлением» (рис. 3) явно прослеживается тенденция к полному или частичному расплавлению разделки с минимальным проникновением в полку (обычно до 1 мм). Кинетический механизм образования таких соединений состоит из двух этапов. На первом изменений не обнаруживается (рис. 3, а, в). Время протекания процесса $t < 1$ с.

На втором этапе начинается расплавление вершины треугольника разделки. При этом температура острия достигает максимального значения. В дальнейшем ($t > 1$ с) происходит

разогрев более удаленных от острия участков разделки, что сопровождается образованием гранта, равномерно выдавливаемого по обе стороны верхней детали (рис. 4, а). При правильно выбранных параметрах УЗС разделка расплавляется полностью (рис. 3, б, в).

Уменьшить грант, улучшить внешний вид изделия и увеличить прочность соединения можно путем принудительного затекания размягченной массы полимера в специальные отверстия или полости нижней детали (рис. 4, б).

Повышение статического давления должно приводить к смятию микронеровностей или вершины V-образного выступа, что снижает концентрацию динамических напряжений на

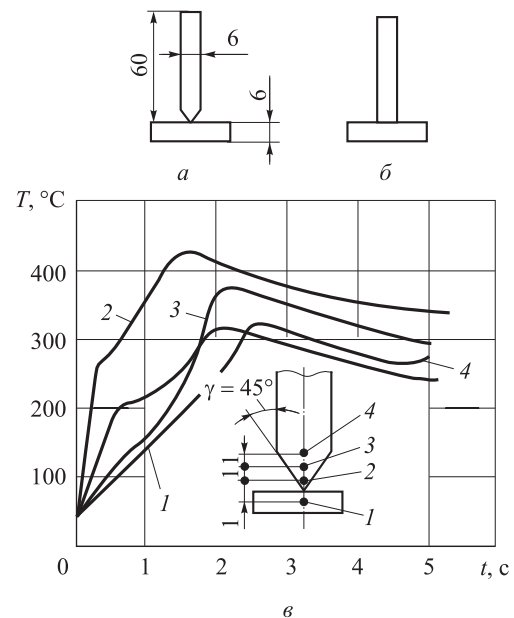


Рис. 3. Кинетический механизм образования соединений по схеме «с преимущественным оплавлением» (материал — полистирол, $A = 30$ мкм, $p_{ст} = 5$ МПа):
1-4 — места расположения термопар

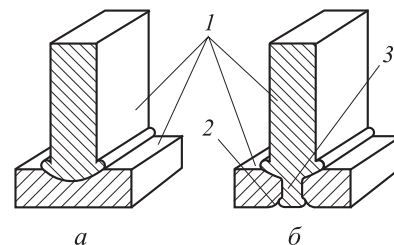


Рис. 4. Схема образования соединений по схеме «с преимущественным оплавлением» при отсутствии (а) и наличии (б) принудительного затекания расплавленного материала в полости нижней детали:
1 — свариваемые детали; 2 — полость в нижней детали;
3 — расплавленный материал

границе раздела. Поэтому, начиная с некоторого достаточно большого значения $p_{ст}$, следует ожидать увеличения времени сварки до момента достижения вязкотекучего состояния или плавления кристаллитов.

При очень большом статическом давлении, когда устраняются все неровности на контактирующих поверхностях и исключается возможность сдвига деталей относительно друг друга, разогрев происходит за счет потерь на внутреннее трение. И до тех пор пока он обусловлен только внутренним трением, время сварки при прочих равных условиях мало зависит от $p_{ст}$.

С уменьшением статического давления растет вероятность сдвига деталей относительно друг друга. При определении времени УЗС как момента достижения температуры вязкотекучего состояния необходимо учитывать ее зависимость от $p_{ст}$. Поэтому начало деформации конусного выступа при повышении давления будет соответствовать более низким температурам. Кроме того, как отмечает большинство исследователей, увеличение времени сварки с ростом давления может быть вызвано снижением амплитуды колебаний волновода вследствие заземления акустической системы.

Измерения амплитуды колебаний оптическим методом показали следующее:

- внутри конусного выступа имеют место чисто продольные колебания;
- снижение амплитуды в середине выступа меньше, чем в краевых зонах, т. е. в них возникают наибольшие напряжения, а следовательно, там происходит разогрев за счет потерь на внутреннее трение.

При этом в середине сварных швов наблюдалась непроваренная круглая зона, хотя по периферии состояние соединения было удовлетворительным. Уменьшение статического давления привело к исчезновению этой зоны.

В процессе проведения экспериментов при больших значениях $p_{ст}$ сварное соединение начинало образовываться не под волноводом, а по периферии создаваемого шва.

Возможность получения качественного соединения при УЗС деталей с V-образной разделкой кромок будет определяться конкуренцией двух процессов: затуханием колебаний в объеме верхней детали и разогревом V-образного выступа.

Рассмотрим разогрев V-образного выступа за счет потерь на внутреннее трение [1, 2, 10]. Поскольку размеры выступа гораздо меньше

длины волны, можно пренебречь происходящими в нем волновыми процессами. Тогда потенциальная энергия выступа определяется выражением

$$W_{пот} = \frac{\hat{\epsilon}^2 E' \omega \eta t}{2} + \frac{\hat{\epsilon}^2 E'}{2} \left[\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{1 + \eta^2}}{2} \cos(2\omega t + \arctg \eta) \right],$$

где $\hat{\epsilon}$ — амплитуда деформации; E' — модуль упругости; ω — круговая частота вынужденных колебаний; η — фактор угла механических потерь.

В этом уравнении первое слагаемое означает необратимую, а второе — обратимую долю потенциальной энергии. Необратимая доля превращается в тепло. Поскольку процесс сварки протекает достаточно быстро, можно считать, что разогрев происходит без теплообмена с окружающей средой. Тогда накопленная за время Δt энергия обеспечивает повышение температуры единицы объема на ΔT :

$$\frac{1}{2} \hat{\epsilon}^2 E' \omega \eta \Delta t = \rho C \Delta T,$$

где ρ — плотность; C — теплоемкость.

Принимая в первом приближении

$$\hat{\epsilon} = A / l_k,$$

где A и l_k — амплитуда колебаний и длина конусного выступа, получим

$$\Delta t = \frac{2\rho C l_k^2 \Delta T}{E' \omega \eta A^2}.$$

Если взять температурные интервалы достаточно малыми и средние температуры каждого интервала сложить с учетом характеристик материала, то можно записать

$$t = \frac{l_k^2}{\omega A^2} \sum_{i=1}^{i=n=T_2} \frac{\rho_i C_i}{E'_i \eta_i / 2} \Delta T_i. \quad (1)$$

Уравнение (1) позволяет рассчитать время сварки до момента размягчения аморфных ПМ или плавления частично кристаллических полимеров как функцию характеристик материала, зависящих от температуры. В этом уравнении не учтена зависимость эластических свойств выступа от статического давления. Однако поскольку в довольно широком диапазоне $p_{ст}$ напряжения в V-образном выступе близки к пределу вынужденной эластич-

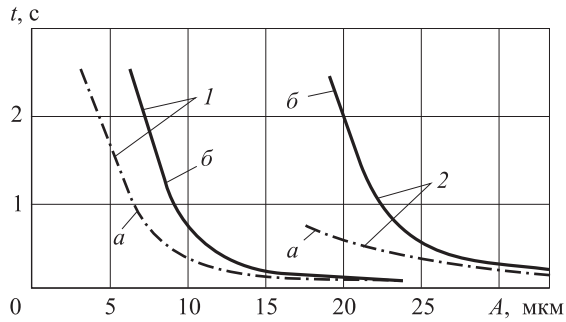


Рис. 5. Расчетная (а) и экспериментальная (б) зависимости времени сварки t до начала размягчения полистирола (1) и поликарбоната (2) от амплитуды A колебаний волновода

ности, такие свойства должны меняться незначительно.

Все зависящие от температуры характеристики материала определяли для частоты нагружения 22 кГц, на которой проводили УЗС образцов. На рис. 5 приведены экспериментальные и теоретические зависимости времени сварки t от амплитуды колебаний A в V-образном выступе.

Переменную деформации выступа нельзя определить точно вследствие сложного распределения амплитуд колебаний, на которое влияет его геометрия, поэтому уравнения (1) недостаточно для того, чтобы судить о пригодности полимера к свариванию. Для оценки свариваемости ПМ можно использовать выражение

$$\psi_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\rho C}{E' \eta / 2} dT, \quad (2)$$

которое представляет собой постоянную безразмерную величину ψ_1 , зависящую только от природы обрабатываемого материала. Числителем подынтегрального выражения является величина, равная количеству необходимого для нагрева на dT тепла, а знаменателем — характеризующая способность материала превращать энергию в тепло за счет внутреннего трения. Верхняя граница интегрирования соответствует температуре размягчения аморфных ПМ или плавления кристаллической составляющей для частично кристаллических полимеров [2, 3, 10].

Из соотношения (2) следует, что лучшая свариваемость с наименьшими затратами энергии достигается при малых значениях числителя и больших значениях знаменателя подынте-

грального выражения, а также при низких температурах размягчения. Модуль эластичности до момента достижения температуры размягчения или плавления должен оставаться высоким и затем резко падать, а фактор потерь — наоборот. Это характерно для аморфных ПМ. У частично кристаллических полимеров модуль эластичности снижается непрерывно с повышением температуры, хотя фактор потерь при этом возрастает незначительно. Кроме того, теплоемкость этих полимеров вблизи температуры плавления возрастает. Следовательно, при сварке частично кристаллических полимеров требуется значительно больше энергии, чем при УЗС аморфных ПМ.

Если выступ разогревается за счет дополнительного источника теплоты — пограничного трения, то при этом совершается работа

$$W = \int_0^s F v dS. \quad (3)$$

Здесь F — переменная акустическая сила; v — коэффициент трения; S — путь,

$$S = mA(t) = ml_k \hat{\epsilon} \sin \omega t,$$

где m — доля энергии, превращающейся в тепло за счет пограничного трения.

Переменная акустическая сила

$$F = \hat{\epsilon} E' S_k \sin \omega t, \quad (4)$$

где S_k — площадь контакта клинообразного выступа с плоскостью нижней детали.

Подставив выражения (1) и (4) в уравнение (3), получим работу за период колебаний

$$W = 2\nu E' \hat{\epsilon}^2 ml_k S_k. \quad (5)$$

Разделив выражение (5) на $l_k S_k$ и умножив на число периодов $n = t\omega / 2\pi$, получим работу в единице объема за время t :

$$W = \nu E' \hat{\epsilon}^2 m \omega t / \pi.$$

Вся энергия, превращающаяся в тепло, состоит из работы внутреннего и внешнего трения, поэтому при отсутствии теплообмена:

$$\eta E' \hat{\epsilon}^2 \omega \Delta t / 2 + m \nu E' \hat{\epsilon}^2 m \omega t / \pi = \rho C \Delta T.$$

С учетом зависимости характеристик полимеров от температуры время сварки до момента размягчения или плавления кристаллов

$$t = \frac{1}{\omega \hat{\epsilon}^2} \int_{T_1}^{T_2} \frac{\rho C}{E' (\eta / 2 + m \nu / \pi)} dT.$$

Отсюда имеем критерий для оценки свариваемости полимеров

$$\psi_2 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\rho C}{E'(\eta/2 + m\nu/\pi)} dT.$$

При УЗС частично кристаллических полимеров необходимо учитывать, что они в значительной степени теряют свои упругие свойства еще до достижения температуры плавления кристаллов $T_{пл}$, поэтому для них значение ψ_2 почти на порядок больше, чем для аморфных ПМ. При температурах, несколько превышающих значение $T_{пл}$, они почти мгновенно переходят в пластическое состояние. Под действием статического давления расплав сразу же вытесняется из зоны сварки, и снова на границе раздела деталей соприкасаются материалы, температура которых соответствует значению $T_{пл}$. Чтобы получить хорошее сварное соединение, необходимо снижать статическое давление, а также размеры выступа до минимально возможных значений, поскольку в противном случае он недостаточно быстро оплавится.

Выводы

1. Физико-механические свойства пластмасс имеют первостепенное значение как для механизма теплообразования при УЗС, так и для технологии процесса. Поэтому следует учитывать изменение физического состояния полимера в процессе сварки.

2. Удельная мощность, выделяемая в единице объема деталей при УЗС, существенно зависит от площади контакта между ними.

3. При конструировании стыков соединяемых деталей необходимо предусмотреть разделку кромок для уменьшения площади контакта между ними, что способствует равномерному распределению температур по всему сварному шву.

4. Разделка кромок при УЗС жестких пластмасс повышает прочность создаваемого соединения, улучшает его внешний вид и сокращает время УЗС.

5. Представлен кинетический механизм сварных соединений «с преимущественным внедрением» и «с преимущественным оплавлением» при УЗС пластмасс.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С. Влияние разделки кромок на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке. *Сварочное производство*, 2013, № 4, с. 24–27.
- [3] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 10–14.
- [4] Volkov S.S. Ultrasound welding of cylindrical components made of polyamide 610. *Welding International*, 2012, № 26(1), pp. 54–57.
- [5] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, № 18(3), pp. 242–245.
- [6] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013, 646 с.
- [7] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, № 26(10), pp. 796–799.
- [8] Гладков Э.А. *Управление процессами и оборудованием при сварке*. Москва, Академия, 2006. 432 с.
- [9] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2015. 288 с.
- [10] Коновалов В.А., Неровный В.М., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория сварочных процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.

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. Vliianie razdelki kromok na svarivaemost' plastmass pri ul'trazvukovoi svarke [Effect of grooving on plastic materials weldability at ultrasonic welding]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Svarochnoe Proizvodstvo]. 2013, no. 4, pp. 24–27.

- [3] Volkov S.S. Ul'trazvukovaia stykovaia svarka zhestkikh plastmass [Ultrasonic butt-seam welding of rigid plastic]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Svarochnoe Proizvodstvo]. 2011, no. 9, pp. 10–14.
- [4] Volkov S.S. Ultrasound welding of cylindrical components made of polyamide 610. *Welding International*, 2012, no. 26(1), pp. 54–57.
- [5] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, no. 18(3), pp. 242–245.
- [6] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2013. 646 p.
- [7] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, no. 26(10), pp. 796–799.
- [8] Gladkov E.A. *Upravlenie protsessami i oborudovaniem pri svarke* [The management of processes and equipment in welding]. Moscow, Akademiia publ., 2006. 432 p.
- [9] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksii* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiia publ., 2015. 288 p.
- [10] Konovalov A.V., Nerovnyi V.M., Kurkin A.S., Makarov E.L., Iakushin B.F. *Teoriia svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Bauman Press, 2007. 752 p.

Статья поступила в редакцию 14.12.2016

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: ssv@bmstu.ru).

КОРОЛЕВ Сергей Анатольевич (Москва) — 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: korolevsa@bmstu.ru).

РОЗАНОВ Дмитрий Сергеевич (Москва) — 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: rozanovds@rambler.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, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ssv@bmstu.ru).

KOROLEV Sergey Anatolievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate 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: korolevsa@bmstu.ru).

ROZANOV Dmitriy Sergeevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate 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: rozanovds@rambler.ru).