

Технология и технологические машины

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2017-3-40-47

Исследование особенностей тепловых и деформационных процессов при ультразвуковой сварке АБС-пластика

С.С. Волков¹, Г.А. Бигус¹, Л.А. Шестель²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² Омский государственный технический университет, 644050, Омск, Российская Федерация, пр-т Мира, д. 11

The Study of Thermal and Deformation Processes in Ultrasonic Welding of ABS Plastics

S.S. Volkov¹, G.A. Bigus¹, L.A. Shestel²¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Omsk State Technical University, 644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11

e-mail: ssv@bmstu.ru, gabigus@mail.ru, weldtechn@mail.ru



Рассмотрены основные характеристики АБС-пластика, а также его сварка ультразвуком, осуществляемая за счет тепла без разогрева всей толщины материала, что позволяет получать сварные соединения большой толщины. Описан механизм образования сварного соединения при ультразвуковой сварке АБС-пластика. Показано, что выделение тепла на свариваемых поверхностях происходит за счет внутреннего трения. Установлено, что при определенном сочетании режимов в процессе ультразвуковой сварки АБС-пластика скорость деформирования при больших давлениях может оказаться выше, чем при малых, что обусловлено конкуренцией четырех факторов: температуры, сварочного статического давления, концентрации энергии на свариваемых поверхностях и отрыва волновода от поверхности свариваемого материала. Определено, что для сварки АБС-пластика необходимо использовать так называемые мягкие режимы ультразвуковой сварки с малыми статическими давлениями и амплитудой колебания рабочего торца волновода. В этом случае сварное соединение достигается только за счет распределения микронеровностей без образования вмятин от волновода на поверхности свариваемого материала. Для определения температур и скорости их нарастания в сварном шве применены термопары со спаем весьма малых размеров. В результате проведенных исследований повышена производительность ультразвуковой сварки АБС-пластика с обеспечением необходимой прочности сварных соединений.

Ключевые слова: частота ультразвуковых колебаний, амплитуда колебаний волновода, сварочное статическое давление, деформация сжатия, ультразвуковая сварка.



This paper describes the main characteristics of ABS plastics and the ultrasound welding that is performed using heat, without heating up the entire thickness of the material, which allows obtaining welds of large thickness. The mechanism of formation of a welded joint by

ultrasonic welding of ABS plastics is defined. It is shown that the heat generated on the welded surfaces is due to internal friction. It is established that at a certain combination of ultrasonic welding modes, the speed of deformation at high pressures may be greater than at lower ones. This is due to four competing factors: temperature, welding static pressure, concentration of energy on the welded surfaces and the separation of the waveguide from the surface of the welded material. It is determined that for welding ABS plastics the so-called soft modes of ultrasonic welding should be used, which are characterized by low static pressures and amplitude of fluctuations of the waveguide. In this case, the weld is achieved only through the distribution of microscopic irregularities, without the formation of dents on the surface of the welded material by the waveguide. To determine the rate of temperature rise in the welded joint, thermocouple junction with very small dimensions is used. As a result of the work, the performance of ultrasonic welding of ABS plastics has been improved, while providing the necessary strength of the welded joints.

Keywords: frequency of ultrasonic fluctuations, amplitude of the waveguide oscillations, static welding pressure, compression deformation, ultrasonic welding.

Промышленное освоение конструкционных пластмасс, таких как АБС-пластик, сополимеры на его основе, полистирол и полиамид, тесно связано с развитием автомобильной, химической и судостроительной промышленности. Для работы в современных конструкциях необходимо использовать материалы, сочетающие в себе хорошую прочность и легкость. Достаточно полно этим требованиям отвечает АБС-пластик, а также сополимеры на его основе [1]. Разнообразие областей применения АБС-пластика потребовало создания и разработки рациональных технологических операций по изготовлению изделий из него. Кроме того, простота технологии переработки АБС-пластика и меньшая по сравнению с металлами стоимость позволяют успешно заменить ими металлические элементы конструкций и различных изделий [2].

Перспектива широкого использования АБС-пластика объясняется высокими физико-механическими характеристиками, доступностью сырья и относительно простой схемой его синтеза. На мировом рынке АБС-пластик конкурирует с полиамидами, ударопрочным полистиролом и наполненными полиэфирами [3, 4].

Применение традиционных методов получения неразъемного соединения АБС-пластика, таких как клепка, склеивание синтетическими клеями и т. п., при нынешнем высоком темпе роста потребления пластмасс стало не столь эффективным вследствие низкой производительности процессов, вредных условий труда, большой трудоемкости и не всегда соответствующего стандартам качества получаемой продукции.

Исходя из вышеизложенного, весьма актуальным является исследование возможности и

выбор наиболее перспективного способа соединения отечественного АБС-пластика применительно к деталям автотракторного машиностроения. Основное распространение при изготовлении пластмассовых узлов автомобилей получили следующие способы сварки: нагретым газом и нагретым инструментом, трением (вибротрением), токами высокой частоты, лазером и ультразвуком [4, 5].

Анализ информационных источников показал, что наибольшее количество публикаций, посвященных вопросам соединения различных деталей в автомобильной промышленности из АБС-пластика, отведено ультразвуковой сварке (УЗС) [3, 6]. УЗС как способ получения неразъемного соединения изделий из полимерных материалов находит все большее применение в различных отраслях экономики, в том числе и в машиностроении. Использование такого способа сварки повышает производительность труда, культуру производства, а также улучшает качество изделий и их товарный вид.

Подвод механической энергии ультразвуковых (УЗ) колебаний осуществляется за счет контакта излучающей поверхности сварочного инструмента — волновода (которую в дальнейшем будем называть рабочим торцом волновода) с одной или несколькими свариваемыми деталями. Такой контакт обеспечивает статическое давление $p_{ст}$ рабочего торца волновода на свариваемые детали, которое также способствует концентрации энергии в зоне соединения и получению прочного сварного соединения (рис. 1).

Цель работы — исследование влияния параметров режима ультразвуковой сварки АБС-пластика на характер термических циклов,

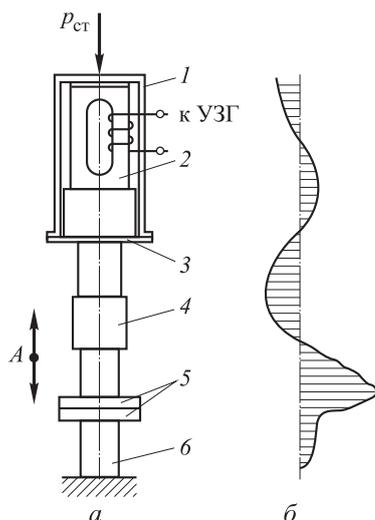


Рис. 1. Схема установки УЗС с нормальным вводом колебаний (а) и эпюра амплитуды колебаний колебательной системы (б):

1 — корпус преобразователя; 2 — преобразователь с обмоткой; 3 — трансформатор упругих колебаний; 4 — волновод; 5 — свариваемые детали; 6 — опора; УЗГ — ультразвуковой генератор; А — амплитуда колебаний волновода-инструмента

а также факторов, влияющих на воспроизводимость термических и деформационных процессов.

АБС-пластики обычно получают эмульсионной полимеризацией смеси мономеров (стирола с акрилонитрилом) в присутствии латекса эластомера. В процессе полимеризации образуется гетерогенная система, состоящая из эластомерной фазы (нерастворимой гель-фракции, основой которой чаще всего является полибутадиен) и растворимой фазы статического сополимера акрилонитрила и стирола.

Размер частиц латекса эластификатора с привитым на них термопластичным полимером колеблется в пределах $0,1 \dots 1,0$ мкм. Такая структура обеспечивает материалу повышенные физико-механические характеристики, химическую стойкость и способность к переработке практически всеми методами. По сравнению с обычными полимерами АБС-пластик обладает более высоким сопротивлением к удару, лучшей химической стойкостью и теплостойкостью при значительных нагрузках. У него существенно больше прочность при растяжении, изгибе и сопротивляемость к воздействию динамических нагрузок, чем у ударопрочного полистирола. От двойных сополимеров стирола их отличают повышенная химическая стойкость, а также хорошая способность к литью и металлизации [3, 4, 6].

Учитывая то, что из всей массы АБС-пластиков, применяемых в настоящее время при изготовлении деталей методом литья, наиболее приемлем материал АБС-2020, все дальнейшие эксперименты проводили с ним на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана. При изучении качественной картины характера изменения термических циклов в зоне сварки и анализа возможности разогрева границы раздела до температур сварки используют выражение для диссипативной функции

$$E_d = E_1 \frac{\operatorname{tg} \eta}{C_p \rho}, \quad (1)$$

где E_1 — динамический модуль упругости; $\operatorname{tg} \eta$ — тангенс угла механических потерь; C_p — теплоемкость; ρ — плотность.

В связи с этим представляет интерес проследить за изменением каждого из показателей, определяющих диссипативную функцию при разогреве АБС-пластика.

Следует отметить, что увеличение содержания эластификатора приводит к значительному падению E_1 (в 2,5 раза) при увеличении концентрации до 25 %. Релаксационный переход в диапазоне температур $120 \dots 130$ °С, при котором резко увеличивается $\operatorname{tg} \eta$ и начинает заметно падать E_1 , очевидно, связан с переходом термопластичной матрицы из стеклообразного состояния в высокоэластическое и соответствует температуре стеклования матрицы. Этот же диапазон является верхним температурным пределом эксплуатации АБС-пластика [7, 8].

Изменение скорости распространения продольной УЗ-волны в исследуемом материале проводили с использованием прибора УКБ-1М. Метод состоит в возбуждении короткого импульса высокочастотных колебаний и измерении времени его распространения при прохождении через образец. В качестве образцов использовали стержни, отлитые из материала АБС-2020, длиной $l = 60 \dots 80$ мм, диаметром $d = 10$ мм.

Скорость распространения продольной УЗ-волны определяли из соотношения

$$c = l/t, \quad (2)$$

где t — время распространения продольной УЗ-волны, регистрируемое прибором.

В результате экспериментов определена скорость распространения продольной УЗ-волны для указанного стержня при частоте 25 кГц и

температуре окружающей среды 25 °С: $c = 1290$ м/с.

Таким образом, при сварке АБС-пластика, обладающего модулем упругости в 1,5–1,7 раза меньшим, чем у полистирола и находящегося по значениям модуля на границе между жесткими и мягкими термопластами, следует ожидать незначительный температурный разрыв между границей раздела и объемом полимера. Это, в свою очередь, грозит появлением нежелательных вмятин и выплесков расплава на поверхности ввода УЗ-колебаний еще до образования качественного сварного соединения.

Все эксперименты по влиянию тепловых и деформационных процессов на свариваемость АБС-пластика проводили на установке УМП-22 [1, 2], которая включала в себя магнотриксционный преобразователь ПМС1-1,5 и ножевой волновод-инструмент из титанового сплава ВТ-5 с рабочей поверхностью 40×8 мм.

В качестве источника питания магнотриксционного преобразователя (сварочного узла) использовали модернизированный серийно выпускаемый фирмой «Ультразвуковая техника ИНЛАБ» (г. Санкт-Петербург) ультразвуковой генератор типа ИЛ 10-1,5 с расширенным диапазоном частот 20...70 кГц, массой 12 кг и габаритными размерами 310×310×160 мм. Генератор оснащен плавной регулировкой мощности до 1,5 кВт, цифровым частотомером и аналоговым индикатором резонанса акустической системы. Он также имеет фазовую автоподстройку частоты и источник поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение генератора — воздушное, принудительное. Выходная частота может меняться в любую сторону.

В процессе экспериментов частоту УЗ-колебаний контролировали с помощью цифрового частотомера, вмонтированного в генератор ИЛ10-1,5, амплитуду колебаний волноводов-инструментов измеряли с помощью специально разработанных на кафедре «Технологии сварки и диагностики» датчиков. Термографирование осуществляли с помощью светолучевого осциллографа Н-115. Испытания на растяжение выполняли на разрывной машине Veshima. Сварку проводили при амплитуде колебаний рабочего торца волновода $A = 30...35$ мкм и сварочном статическом давлении $p_{ст} = 1,5...4$ МПа. Далее исследовали распределение прочности в стыковых соединениях по ширине шва.

Для возможности контроля деформационных процессов, протекающих при УЗС в зоне

контакта рабочей части волновода и поверхности свариваемого образца, а также для выбора оптимального значения осадки, установка УМП-22 оборудована дифференциально-трансформаторным датчиком перемещения, преобразующим координату положения сварочного узла относительно исходной толщины свариваемых образцов в электрический сигнал. При этом, как оказалось, важную роль играет жесткость сварочной машины, в значительной степени влияющая на достоверность получаемых результатов, что необходимо учитывать при проектировании новой сварочной техники [9].

Результаты экспериментов показали, что общая деформация материала в зоне сварки, фиксируемая датчиком перемещения, имеет расхождение с данными, полученными при прямых замерах и последующем определении разницы между начальной и остаточной толщинами образцов после сварки.

Одной из причин отсутствия в литературных источниках какой-либо информации о характере термических циклов при ультразвуковой сварке АБС-пластика является невозможность воспроизведения результатов тепловых и деформационных исследований. В свою очередь, это может быть обусловлено отсутствием единообразия в методиках проведения таких исследований.

Обычно замеры температур в зоне сварки пластмасс проводят с помощью хромель-копелевых термопар, спаи которых, а также зона их зачеканки являются концентраторами энергии ультразвука, что может вызвать погрешности при измерении тепловых полей [1, 8, 10].

В экспериментах сделана попытка выделения отдельно кинетики разогрева и деформирования зоны сварки с концентратором напряжения на границе и без него. Для этого в одном случае термопара фиксировалась на поверхности образца без зачеканки, т. е. ее головка полностью выступала над поверхностью, а в другом — предпринимались попытки найти метод зачеканки, обеспечивающий положение головки строго заподлицо с поверхностью контакта, в искусственное заглубление, выполненное на поверхности нижнего образца. При таком способе зачеканки появился разброс температур, связанный с различным положением головки спаи по глубине отверстия, достаточная точность изготовления которого сверлением труднодостижима. Кроме того, отсутствие плотного контакта головки со стенкой отвер-

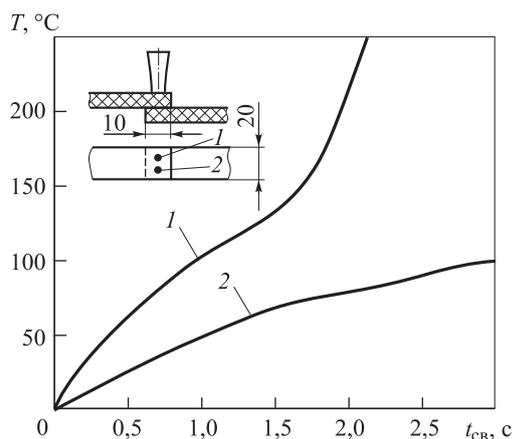


Рис. 2. Термический цикл ультразвуковой сварки АБС-пластика в зонах выпуклости поверхности (1) и впадины (2) при $A = 30$ мкм и $p_{ст} = 2,5$ МПа

ствия также приводило к искажению термических и деформационных циклов [8, 10].

Наилучшие результаты в плане достоверности термических циклов удалось получить при зачеканке термопары посредством ее внедрения в тело нижнего образца импульсом УЗ-колебаний с частотой 20 кГц и продолжительностью 1 с при статическом давлении 2,5 МПа через стальную пластину толщиной 1 мм. При этом вытесняемый термопарой объем материала под действием приложенного статического давления равномерно растекался по поверхности образца, тем самым исключая образование наплывов, что и позволило добиться удовлетворительной воспроизводимости в проводимых опытах.

Эксперименты по определению тепловых процессов проводили на образцах, вырезанных из листового пластика АБС-2020 (ТУ 6-05-1587–84) толщиной $h = 2$ мм. При этом ширина образцов составляла 20 мм, а значение нахлестки — 10 мм. Таким образом, номинальная площадь контакта образцов в экспериментах оставалась неизменной и равной 200 мм^2 . По этой же площади осуществляли и ввод УЗ-колебаний в материал. В опытах использовали схему сварки с образованием нахлесточных соединений при наличии только естественной шероховатости на соединяемых поверхностях. Для предотвращения относительного смещения образцов при сварке последние фиксировали в опорном узле экспериментальной установки УМП-22 прижимной планкой.

Как показали результаты первых экспериментов, даже наличие только естественной шероховатости сыграло определенную роль в формировании сварного шва.

Перед сваркой на границе раздела одновременно размещали две термопары 1 и 2, причем первая из них фиксировала температуру в зоне выпуклости (рис. 2, кривая 1), а вторая — во впадине (рис. 2, кривая 2). Как видно из рис. 2, преимущественное теплообразование происходило в зоне с положительным отклонением от номинального размера, т. е. на выпуклости, в то время как во впадине происходила задержка в развитии температуры, значение которой не превысило $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Визуальный осмотр поверхностей раздела после разрушения образцов показал, что зона зачеканки термопары 1 характеризуется стадией развития объемных взаимодействий, когда граница раздела практически исчезает, в то время как в зоне термопары 2 поверхность границы раздела не претерпела каких-либо существенных изменений.

Хорошие результаты в плане повторяемости характера термических циклов были получены только после уменьшения ширины образцов до 7 мм и нахлестки до 5 мм, что обеспечило номинальную площадь контакта образцов, не превышающую $35 \dots 40 \text{ мм}^2$, и исключило влияние волнистости.

Вопрос о влиянии сварочного статического давления на характер разогрева при сварке АБС-пластика в основном рассматривали как фактор, способствующий созданию акустического контакта и уплотнению материала.

Начиная с некоторого значения $p_{ст}$, когда микронеровности полностью сминаются, влияние сварочного статического давления на характер термических циклов можно свести к минимуму. Такой характер термических циклов подтвержден данными, приведенными на рис. 3. При малых давлениях ($p_{ст} = 1,25$ МПа) наблюдается резкий подъем температуры с последующим уменьшением скорости роста в области $150 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$. При $p_{ст} \geq 4$ МПа увеличение температуры происходит непрерывно, хотя и с гораздо меньшей скоростью в области $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Термические циклы, полученные при $p_{ст} \geq 4$ МПа, совпадают в пределах погрешности эксперимента, что свидетельствует о независимости скорости разогрева от сварочного статического давления в этом диапазоне и амплитуды колебаний волновода $A = 30$ мкм.

При сварке АБС-пластика наблюдается закономерность — чем выше давление, тем медленнее идет процесс разогрева. Это объясняется тем, что чем больше давление, тем меньше

возможность проскальзывания деталей друг относительно друга и, соответственно, эффект внешнего трения при УЗС. Однако при определении коэффициента трения между материалами при наложении УЗ-колебаний можно обнаружить, что значение последнего уменьшается с увеличением амплитуды колебаний волновода.

Таким образом, проведенный анализ позволяет предложить следующий механизм ультразвуковой сварки АБС-пластика. Преимущественный разогрев в начале процесса происходит по вершинам микронеровностей, имеющих на соединяемых поверхностях. Причем, поскольку термопара расположена на уровне вершин этих микронеровностей, можно считать, что она регистрирует усредненную по объему этих неровностей температуру.

Если микронеровности отсутствуют, то процесс УЗС должен развиваться по классической схеме: чем больше давление, тем выше скорость разогрева.

Следовательно, можно ожидать, что скорости разогрева в объеме материала при сварке под большим давлением будут выше, чем под малым, так как здесь процесс развивается по классической схеме, а на поверхности — наоборот, за счет концентрации энергии на микронеровностях. Эти выводы также подтверждаются графиками, приведенными на рис. 4, где показано распределение температур по толщине образцов, полученное при сварке АБС-пластика со статическим давлением $p_{ст} = 1,25$ и 4 МПа.

Как видно из рис. 4, к одному и тому же моменту времени ($t_{св} = 1,3$ с) при сварке с давлением $p_{ст} = 4$ МПа температуры практически во всем объеме полимера были больше почти в 1,5 раза, чем при сварке с давлением $p_{ст} = 1,25$ МПа. И только в очень узкой области толщиной не более 0,3 мм, примыкающей к границе раздела полимеров, температура при $p_{ст} = 1,25$ МПа была в 2,5 раза больше, чем при $p_{ст} = 4$ МПа, что, как уже отмечалось, обусловлено концентрацией энергии в этой зоне.

При анализе деформационных процессов, протекающих при сварке АБС-пластика, основное внимание следует уделять процессам, связанным с микрорельефом свариваемых поверхностей: смятию микронеровностей и выравниванию контактных поверхностей.

В общем случае деформация, фиксируемая датчиком перемещения волновода относительно опоры, обусловлена следующими причинами:

внедрением рабочего торца волновода в наружную поверхность свариваемой детали как в процессе пропускания ультразвука, так и на стадии проковки;

вытеканием расплава из зоны контакта соединяемых поверхностей в периферийные области сварного соединения.

Так, внедрение рабочего торца волновода в поверхность соприкасающейся с ним детали вызвано выделением теплоты в этой зоне, вследствие чего предел текучести материала становится сравним с контактными напряжениями. Вытекание расплава является обязательным условием прохождения стадии развития объемных взаимодействий, сопровождающейся перемешиванием расплава на границе раздела и диффузионными процессами [1, 4, 10].

Смятие микронеровностей начинается уже на стадии образования физического контакта и зависит от упругих свойств материала. На этой стадии формируется фактическая площадь контакта, которая влияет на концентрацию энергии на границе раздела.

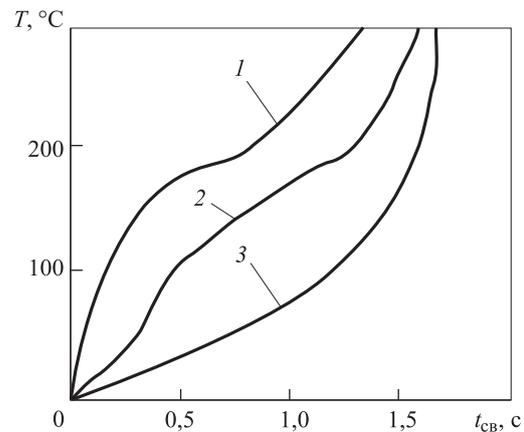


Рис. 3. Термические циклы при ультразвуковой сварке АБС-пластика с зачеканкой термопар импульсом УЗ-колебаний при статическом давлении $p_{ст} = 1,25$ (1); 2,5 (2); 4 (3) МПа

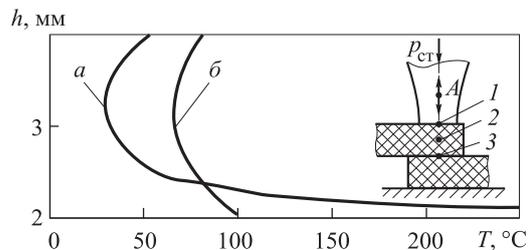


Рис. 4. Распределение температуры T по толщине h верхнего образца при ультразвуковой сварке АБС-пластика ($t_{св} = 1,3$ с; $A = 30$ мкм) со статическим давлением $p_{ст} = 1,25$ (а) и 4 МПа (б): 1, 2, 3 — термопары

Измерения предварительной деформации сжатия проводили с помощью датчика деформации [9]. Для снятия погрешностей измерений, обусловленных жесткостью установки, сначала выполняли эксперименты по измерению деформаций без образца, а затем с образцом при одинаковых значениях $p_{ст}$. Зависимость деформации сжатия от сварочного статического давления определяли как разность результатов указанных измерений.

Образцы начинают деформироваться уже при значениях $p_{ст} = 1,25 \dots 1,5$ МПа (см. рис. 4). Малое значение этих давлений, по сравнению с пределом текучести данного материала, позволяет предположить, что деформирование происходит не во всем объеме полимера, а только на границе контакта вследствие смятия микронеровностей. Это подтверждает гипотезу о наличии концентрации напряжений на границе раздела, когда фактические контактные напряжения на отдельных микровыступах становятся сопоставимы с пределом текучести. После достижения $p_{ст} = 4$ МПа дальнейшая деформация становится незначительной, что, очевидно, свидетельствует о приближении значения фактической площади контакта к номинальной, когда для деформирования поверхности необходимо прикладывать значительно большие статические давления.

Можно предположить, что сваривание АБС-пластика обусловлено в первую очередь оставшимися несмятыми микронеровностями и невыровненными контактными поверхностями, которые нагреваются по кинетике разогрева концентраторов энергии, оплавляются и растекаются, образуя как бы связующий соединяемые детали материал. Поскольку отклонения формы контактных поверхностей носят случайный ха-

рактер, зоны схватывания при сварке будут представлять собой случайно расположенные пятна, возникающие там, где есть контакт.

В рамках предложенного механизма сварки такой характер деформирования объясняется влиянием сразу четырех конкурирующих факторов: температуры, сварочного статического давления, концентрации энергии на границе раздела и отрывов волновода. Причем если первые три фактора способствуют интенсификации процесса деформирования, то отрыв волновода замедляет его.

Выводы

1. Анализ свойств АБС-пластика показал, что по динамическим характеристикам он занимает промежуточное место между жесткими и мягкими пластмассами.

2. Показана кинетика разогрева и деформирования сварочной зоны при ультразвуковой сварке АБС-пластика.

3. Предложен механизм разогрева АБС-пластика при УЗС, который позволяет исключить влияние неровностей, имеющих на поверхности контакта волновода со свариваемым изделием, увеличить теплоотвод от поверхности последнего в подволноводной зоне, а также повысить прочность и качество сварного соединения.

4. Установлено, что для ультразвуковой сварки АБС-пластика необходимо использовать так называемые мягкие режимы сварки с малыми сварочным статическим давлением и амплитудой колебаний рабочего торца волновода. В этом случае сварное соединение достигается только за счет расплавления микронеровностей без образования вмятин от волновода на поверхности материала.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 15–20.
- [3] Волков С.С., Бигус Г.А. Влияние физико-механических свойств при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс на процесс теплообразования. *Технология машиностроения*, 2016, № 2, с. 34–39.
- [4] 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.
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Welding International*, 2016, vol. 30(2), pp. 150–154.
- [6] Volkov S.S. Ultrasound control welding of polymer packages containing food products. *Welding International*, 2009, vol. 23(3), pp. 213–218.
- [7] Volkov S.S. Ultrasound welding of synthetic fabric for technical purposes. *Welding International*, 2009, vol. 23(10), pp. 193–197.

- [8] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013, 646 с.
- [9] Гладков Э.А. *Управление процессами и оборудованием при сварке*. Москва, Академия, 2006. 432 с.
- [10] Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 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. Ul'trazvukovaia stykovaia svarka zhestkikh plastmass [Ultrasonic butt-seam welding of rigid plastic]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Svarochnoe Proizvodstvo]. 2011, no. 9, pp. 15–20.
- [3] Volkov S.S., Bigus G.A. Vliianie fiziko-mekhanicheskikh svoistv pri ul'trazvukovoi svarke raznorodnykh plastmass na protsess teploobrazovaniia [Influence of physical and mechanical properties on the thermogenesis process during the ultrasonic welding of heterogeneous plastics]. *Tekhnologiya mashinostroeniia* [Tekhnologiya Mashinostroeniya]. 2016, no. 2, pp. 34–39.
- [4] 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.
- [5] Volkov S.S., Shestel L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Welding International*, 2016, vol. 30(2), pp. 150–154.
- [6] Volkov S.S. Ultrasound contour welding of polymer packages containing food products. *Welding International*, 2009, vol. 23(3), pp. 213–218.
- [7] Volkov S.S. Ultrasound welding of synthetic fabric for technical purposes. *Welding International*, 2009, vol. 23(10), pp. 789–795.
- [8] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2013. 646 p.
- [9] Gladkov E.A. *Upravlenie protsessami i oborudovaniem pri svarke* [Management of processes and equipment for welding]. Moscow, Akademiia publ., 2006. 432 p.
- [10] Makarov E.L., Yakushin B.F. *Teoriia svarivaemosti staley i splavov* [Theory of weldability of steels and alloys]. Moscow, Bauman Press, 2014. 487 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).

БИГУС Георгий Аркадьевич (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: gabigus@mail.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: weldtechn@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, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ssv@bmstu.ru).

BIGUS Georgiy Arkadievich (Moscow) — 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: gabigus@mail.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: weldtechn@mail.ru).