

Технология и технологические машины

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2017-2-30-38

Контроль качества сварных соединений в процессе ультразвуковой сварки пластмасс

С.С. Волков¹, А.А. Дерябин¹, С.С. Холодов²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1² ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5

Quality Control of Welded Joint During Ultrasonic Welding of Plastics

S.S. Volkov¹, A.A. Deryabin¹, S.S. Kholodov²¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1² Federal State Autonomous Institution Research and Educational Centre for Welding and Controlat Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5

e-mail: map@bmstu.ru, aad1_2000@mail.ru, holodovs@mail.ru



Показано, что изменение амплитуды колебаний опоры полностью определяется изменением таких свойств свариваемого полимерного материала, как температура, деформация и усилие поджатия. Дан обзор существующих способов дозирования вводимой механической энергии при ультразвуковой сварке по времени, осадке и фиксированному зазору. Предложено оценивать состояние свариваемого материала между волноводом и датчиком-опорой по уровню прошедшей через полимерный материал энергии, измеряемой датчиком-опорой. Результаты экспериментов подтвердили зависимость колебаний опоры от времени ультразвуковой сварки, названной кинетической характеристикой, что позволяет решать вопросы, касающиеся связи продолжительности сварочного импульса с состоянием свариваемого полимерного материала. При ультразвуковой сварке различных пластмасс кинетическая характеристика, отражающая физическое состояние полимера в зоне сварного соединения может быть применена для контроля качества сварных соединений. Описанные свойства кинетической характеристики обусловили применение метода сопутствующего контроля по такой характеристике в ручном и в автоматическом вариантах. Сопутствующий контроль процесса ультразвуковой сварки полимеров обеспечивает стабильное получение высококачественных сварных соединений при возможной нестабильности как полимерного материала, так и работы ультразвукового генератора.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, амплитуда колебаний опоры, частота ультразвуковых волн, кинетическая характеристика, прочность сварного соединения, сопутствующий контроль.



It is shown that the change of the oscillation amplitude of the support is wholly determined by the change of such properties of the welded polymeric material as temperature, deformation, and preload. A review of existing methods of batching the input mechanical energy by time, setting, and a fixed gap during ultrasonic welding is presented. It is

proposed that the condition of the welded material between the waveguide and the support sensor should be assessed by the level of energy passed through the polymeric material and measured by the support sensor. The experiments have confirmed the dependence of the support oscillations on the ultrasonic welding time, known as the kinetic characteristic. It can be used to solve problems of the relationship between the duration of the welding pulse and the condition of the welded polymer material. In ultrasonic welding of various plastic materials, the kinetic characteristic reflects the physical condition of the polymer in the weld joint zone, and can be used for quality control of the welded joints. The aforementioned properties of the kinetic characteristic determine the application of the in-process control as two options: manual and automatic. The in-process control of the polymer ultrasonic welding consistently guarantees high quality of the welded joints while allowing for possible irregularities in the polymer material as well as the operation of the ultrasonic generator.

Keywords: ultrasonic welding, vibration amplitude of the support, ultrasonic wave frequency, kinetic characteristics, joint weld strength, in-process control.

Неуклонный ежегодный рост применения пластмасс и отдельных пластмассовых деталей, являющихся частями различного рода конструкций, ставит перед промышленностью вопрос выбора высокопроизводительного, надежного и экономичного способа сварки изделий. Он должен быть универсальным, а оборудование для его реализации должно быстро перенастраиваться на соединение деталей, размеры которых могут колебаться в заданном диапазоне.

Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов соединения является ультразвуковая сварка (УЗС). Специфические особенности УЗС полимеров позволили ей занять место в ряду перспективных технологических процессов. К ее преимуществам относятся высокая производительность, телеэффект (сварка в отдалении от точки ввода энергии), возможность соединения поверхностей, загрязненных маслами, щелочами или кислотами без их очистки, и др. [1, 2].

Вместе с ростом применения пластмасс в производстве, быту и строительстве повышаются и требования к качеству сварных соединений из пластмасс. Известно, что качество таких соединений различных материалов определяется не только правильно выбранной технологией и сварочным оборудованием, но и совершенством метода их контроля.

В процессе отработки технологий и в создании оборудования для сварки пластмасс за последние годы достигнуты значительные успехи. Контроль же качества сварных соединений из пластмасс все еще связан с определенными трудностями, которые зависят от способа и технологического процесса сварки, вида сварной конструкции, свойств и строения поли-

мерных материалов (ПМ). Поэтому в настоящее время все большее значение приобретает повышение эффективности контроля качества сварных соединений ПМ под действием механических нагрузок, а также высоких и низких температур [3, 4].

Повысить технологическую надежность УЗС можно либо повышением надежности сварочного оборудования, либо совершенствованием методики и средств сопутствующего контроля процесса сварки.

Цель работы — определение оптимальной продолжительности ультразвукового сварочного импульса, соответствующего максимальной прочности сварного соединения, по кинетической характеристике.

Сварные соединения, выполненные УЗС из пластмасс высокого качества и со стабильными свойствами, могут быть получены при проведении комплекса мероприятий, контроль за соблюдением которых должен осуществляться на всех этапах изготовления изделий. При нарушении технологии изготовления сварных соединений в них могут возникать дефекты либо сразу после сварки, либо в процессе эксплуатации, поэтому необходимо выполнять контроль на всех стадиях изготовления изделий из пластмасс.

Требования к исходному ПМ заключаются в хорошей акустической проводимости, однородности свойств и свариваемости при оптимальных режимах УЗС. Особое внимание на контроль исходного ПМ должно быть обращено в случае применения отходов основного производства.

Контроль исходного ПМ в простейшем случае осуществляют визуально. Например, на изделиях, изготовленных из отходов полистиро-

ла, иногда можно заметить «мраморный» рисунок, появление которого объясняется плохим перемешиванием расплавленного материала. Для получения количественных характеристик ПМ проводят акустические измерения как на образцах из свариваемого материала, так и на изделиях [4, 5].

Акустические свойства свариваемых ПМ определяются двумя наиболее важными параметрами: скоростью ультразвуковых колебаний c и коэффициентом затухания β . Эти параметры могут быть использованы при оценке пригодности новых ПМ, их композиций, красителей, наполнений и т. п. к сварке пластмасс, а также для научного обоснования конструирования изделий, их геометрии, максимально возможной толщины свариваемых деталей и т. д.

Для определения основных акустических характеристик свариваемых пластмасс можно использовать приборы УКБ-1 и УКБ-1М с диапазоном рабочих частот 25, 60, 100 и 150 кГц, который должен соответствовать частоте преобразователя, применяемого в сварочной машине [1].

Сущность измерения акустических характеристик исследуемых материалов заключается в следующем. В образец щупом вводится ультразвуковой импульс, многократные отражения которого от параллельных поверхностей образца улавливаются приемной искательной головкой. Отслеживая на экране электронно-лучевой трубки параметры отраженных импульсов, можно определить скорость распространения продольной волны ультразвуковых колебаний и коэффициент затухания.

Скорость продольной волны определяли из зависимости

$$c_{\text{пр}} = x/t,$$

где x — длина образца; t — время прохождения импульса через образец.

Как показали измерения, скорость продольных волн в исследуемых ПМ с увеличением частоты повышается. В таблице приведены значения скорости $c_{\text{пр}}$ и длины волны λ для некоторых ПМ при частоте от 25 до 150 кГц.

Нарушение теплового режима технологического процесса изготовления изделий может приводить к их деформации, которая бывает двух типов. *Деформации первого типа* определяются несовпадением контактирующих при сварке элементов (выступов, пазов, штырей и т. д.) или полуформ по контуру. При этом бракованное соединение несложно обнаружить непосредственно после сварки. *Деформации второго типа*, наиболее опасные для изделий из «жестких» полимеров, характеризуется наличием зазоров между сопрягаемыми поверхностями. Приложение статического давления приводит к тому, что зазоры закрываются, однако появляющиеся при этом внутренние напряжения приводят к разрушению изделия в процессе эксплуатации [6].

Проверка на внутренние напряжения для неокрашенных, оптически прозрачных полимеров состоит в наблюдении изделий в поляризованном свете [6, 7]. Для непрозрачных материалов можно рекомендовать испытание, заключающееся в погружении изделия в поверхностно-активную жидкость (например, в керосин) и в наблюдении за появлением на нем трещин [7].

Введение добавок (стабилизаторов, наполнителей, смазывающих веществ, пластификаторов и т. п.) при изготовлении изделий может существенно повлиять на их свариваемость. Увеличение содержания некоторых из наполнителей (особенно смазывающих веществ) способно привести даже к полной потере свариваемости. Таким образом, для обеспечения необходимых свойств сварных соединений следует соблюдать тепловой режим УЗС и обеспечивать

Значения скорости $c_{\text{пр}}$ и длины волны λ для некоторых ПМ

Частота, кГц	Полиметил- метакрилат		Полистирол		Капролон		Винипласт		Полиэтилен	
	$c_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, мм/с	λ , мм	$c_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, мм/с	λ , мм	$c_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, мм/с	λ , мм	$c_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, мм/с	λ , мм	$c_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}$, мм/с	λ , мм
25	2,37	95	1,99	79	2,28	91	1,98	79	1,25	50
60	2,51	42	2,04	34	2,35	39	2,12	35	1,35	23
100	2,56	26	2,14	21	2,41	24	2,19	22	1,51	15
150	2,65	18	2,24	15	2,58	17	2,21	15	1,73	12

постоянное содержание добавок в исходном состоянии.

На прочностные свойства и стабильность качества сварных швов могут влиять различные параметры, связанные с качеством исходной продукции, переработкой полимера, изготовлением изделий, изменением свойств сварочной машины и др. Влияние некоторых из этих параметров может быть уменьшено отработкой технологических режимов изготовления сварных изделий, тщательным выходным контролем и выбором соответствующих ультразвуковых генераторов. Поэтому наряду с разработкой сварочных ультразвуковых машин необходимо развивать методы и приборы сопутствующего контроля, позволяющие следить непосредственно в процессе сварки за состоянием исходного материала, устранять различные случайные возмущения и регулировать количество подводимой к изделию ультразвуковой энергии в зависимости от условий сварки [1, 8]. Дозирование ультразвуковой энергии обычно осуществляется регулированием (ограничением) продолжительности ультразвукового импульса тремя способами:

- вручную сварщиком-оператором на основании его практических навыков, причем точность определения выдержки зависит от его квалификации, что может внести в процесс субъективную ошибку;

- сваркой «по фиксированному времени», что предполагает использование ультразвукового импульса постоянной продолжительности при соединении однотипных изделий;

- сваркой «с фиксированной осадкой», что означает постоянство глубины вдавливания волновода в свариваемую деталь и приводит к деформации зоны шва (осадка $\Delta = \text{const}$). При достижении заданной деформации, обеспечивающей наилучшие характеристики сварного соединения, происходят автоматическое выключение ультразвука и ограничение перемещения волновода. Продолжительность ультразвукового импульса при таком способе сварки в неодинаковых условиях может быть разной.

При сварке «по фиксированному времени» вероятность появления бракованного сварного соединения будет определяться нестабильностью частоты генератора, исходной толщины свариваемого полимера и условий сварки (температуры волновода и статического давления $p_{\text{ст}}$).

В отличие от сварки «по фиксированному времени» схема сварки «с фиксированной осад-

кой» частично связана с кинематикой образования сварного соединения. В этом случае вероятность появления бракованного соединения определяется только нестабильностью исходной толщины свариваемого полимера.

Механические испытания сварных швов, полученных при сварке по двум описанным схемам ограничения продолжительности импульса [1], подтверждают большую эффективность второго из них, однако этот способ требует получения изделия с малым допуском по разнотолщинности. Технологические процессы переработки ПМ (литье под давлением, вакуумформирование и др.) не всегда обеспечивают это условие. При сварке изделий из жестких полимеров (полистирола, винипласта и др.) высокая прочность шва достигается при осадке полимера, составляющей десятые и сотые доли миллиметра, поэтому разнотолщинность приводит к появлению большого числа бракованных соединений. Кроме того, при использовании схемы сварки «с фиксированной осадкой» происходит некоторая деформация зоны шва, что иногда бывает недопустимо вследствие ухудшения товарного вида изделия. Эту схему выключения ультразвукового импульса нельзя применять при сварке пленочных материалов малых толщин.

Основное, что определяет прочность сварного соединения пластмасс, — это тепловой режим сварки. Наличие высокой температуры в зоне соединения является необходимым условием получения прочных сварных швов. В противном случае не обеспечивается коалесценция, в результате чего участки соединения, имеющие невысокую температуру в процессе сварки, становятся очагами разрушения сварного шва. Температура в нем определяет также развитие диффузионных процессов при сварке и возможное перемешивание слоев ПМ, находящихся в вязкотекучем состоянии.

При УЗС тепловой режим определяется в основном количеством вводимой в зону сварного соединения энергии ультразвуковых колебаний, дозирование которой обычно осуществляется регулированием продолжительности сварочного импульса. Один из способов определения продолжительности сварочного импульса основан на контроле энергетических параметров ультразвуковых колебаний, проходящих через свариваемое изделие [1]. В процессе УЗС ультразвуковые колебания, вводимые в изделие, распространяются в ПМ

от рабочего торца волновода-инструмента к опоре. В результате нагрева ПМ в зоне сварки изменяются физико-механические свойства полимера и акустическая проводимость, т. е. меняются условия прохождения ультразвуковых колебаний. Исходя из этого, при постоянной амплитуде колебаний рабочего торца волновода-инструмента амплитуда колебаний опоры в процессе сварки будет изменяться во времени.

Амплитуда колебаний опоры a , на которой происходит сварка, пропорциональна значению сигнала датчика и определяется интенсивностью прошедшей через полимер в процессе сварки ультразвуковой волны:

$$a = AD\sqrt{re^{\beta h}},$$

где A — амплитуда колебаний рабочего торца волновода; D — коэффициент пропускания ультразвуковых колебаний; r и β — коэффициенты рассеивания и затухания; h — толщина слоя ПМ.

На изменение амплитуды колебаний опоры наиболее существенно влияют коэффициент затухания β и толщина полимера h .

Как показали результаты исследования, изменение амплитуды колебаний опоры в процессе сварки, зависящее от перечисленных параметров, полно и всесторонне отражает изменение свойств полимера и процесс образования сварного соединения. Поэтому зависимость амплитуды колебаний опоры a от времени сварки $t_{\text{св}}$ получила название «кинетическая характеристика» процесса (рис. 1).

Приведенная на рис. 1 зависимость характеризует состояние нагреваемого полимера и его толщину без непосредственного измерения температуры и его размеров. Поскольку амплитуда колебаний опоры a связана во времени с важнейшими параметрами сварки — темпера-

турой в сварном шве и деформацией ПМ, функцию $a = f(t_{\text{св}})$ можно использовать для описания зависимости состояния полимера от продолжительности сварочного импульса, т. е. осуществлять таким образом сопутствующий контроль качества сварных соединений по амплитуде колебаний опоры a , на которой располагается свариваемое изделие из пластмасс [1, 9].

Как показано на рис. 1, кинетическая характеристика процесса сварки может быть разделена на три участка.

На участке I сигнал датчика уменьшается от начального значения $a_{\text{нач}}$, определяемого исходными свойствами полимера, до некоторого минимального значения $a_{\text{мин}}$. Снижение сигнала можно объяснить увеличением коэффициента поглощения среды в результате нагрева. В течение некоторого времени (участок II) значение сигнала $a_{\text{мин}}$ остается постоянным. Продолжительность этого периода зависит от свойств и толщины полимера. Для участка III характерно увеличение сигнала до максимального значения $a_{\text{макс}}$, вызванное продавливанием полимера до полного разрушения. В момент выхода кинетической характеристики на минимальный уровень разогрев материала достигает максимального значения, поэтому моменту образования сварного соединения соответствует граница между участками I и II.

Возможность контроля сварки по кинетической характеристике подтверждается ее связью со следующими параметрами: температурой в зоне сварки, осадкой полимера под волноводом, площадью сварной точки, прочностью сварного соединения (разрывным усилием) и тепловыделением в образце (рис. 2).

К моменту выхода сигнала датчика на минимальный уровень $a_{\text{мин}}$ температура в шве максимальна и достигает температуры вязкотекучего состояния полимера, а осадка минимальна и существенно не снижает прочность сварного соединения. Площадь сварной точки к этому моменту достигает 90...95 % максимально возможной, а прочность сварного соединения максимальна. В этой же точке кинетической характеристики наблюдается перелом функции тепловыделения $W = f(t_{\text{св}})$. До момента сварки выделение тепла происходило как в массе полимера (по границам сферолитов и микронеоднородностей), так и по границам свариваемых элементов. Перелом функции $W = f(t_{\text{св}})$ свидетельствует об исчезновении границы раздела как

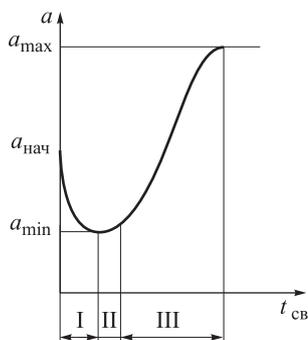


Рис. 1. Кривая кинетической характеристики процесса УЗС пластмасс

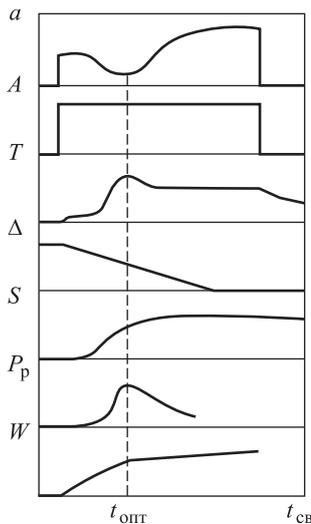


Рис. 2. Взаимосвязь кинетической характеристики a с амплитудой колебаний волновода A , температурой в зоне сварки T , осадкой полимера под волноводом Δ , площадью сварной точки S , разрывным усилием P_p и тепловыделением W в образце:
 $t_{\text{опт}}$ — оптимальное время сварки

акустического сопротивления, т. е. об образовании монолитного соединения.

Таким образом, оптимальная продолжительность ультразвукового импульса определяется временем, за которое сигнал датчика изменяется от начального значения $a_{\text{нач}}$ до минимального $a_{\text{мин}}$ (см. рис. 1).

В данной работе взаимосвязь между кинетической характеристикой, тепловым режимом (значениями максимальной температуры в зоне сварного соединения), деформацией ПМ в зоне сварки и прочностью сварного соединения при УЗС стыковых сварных соединений жестких пластмасс использовали для определения оптимальной продолжительности ультразвукового сварочного импульса $t_{\text{уз}}$, соответствующего максимальной прочности сварного соединения, по кинетической характеристике [1, 9].

Исследовали две группы образцов размером $50 \times 15 \times 10$ мм из ударопрочного полистирола. Они имели разную разделку кромок: первая группа — V-образную (рис. 3, а), вторая — для последовательно-ступенчатой концентрации энергии ультразвуковых колебаний (рис. 3, б).

Сварку выполняли на установке МТУ-1,5. Рабочая частота акустической системы составляла 22 кГц. Для сварки применяли ножевой волновод-инструмент экспоненциальной формы. Термографирование проводили с помощью хромелькопелевых термопар диаметром 0,4 мм.

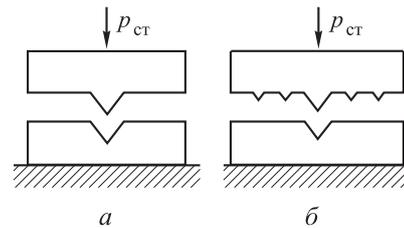


Рис. 3. Разделка кромок образцов из ударопрочного полистирола:
 a — V-образная; b — для последовательно-ступенчатой концентрации энергии ультразвуковых колебаний

Деформацию ПМ в зоне сварки измеряли индуктивным датчиком перемещений [10].

При проведении исследования также использовали разработанный на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана магнитоупругий датчик для измерения быстропеременных усилий с частотой 20...40 кГц при УЗС пластмасс. Он выполнен в виде настроенной четвертьволновой опоры, представляющей собой никелевый стержень, верхняя часть которого и является опорой, на которой размещается свариваемая деталь (рис. 4).

На верхний слой датчика для уменьшения износа рабочей поверхности наплавлен стеллит на никелевой основе ВХН. На никелевом стержне расположены: I — обмотка подмагничивания для создания постоянного магнитного потока; II — рабочая обмотка, в которой возникает измеряемая ЭДС при нагружении датчика внешней переменной механической нагрузкой.

Взаимосвязь исследуемых параметров для двух групп образцов приведена на рис. 5. Как видно, в обоих случаях деформация ПМ в зоне сварки начинается раньше достижения макси-

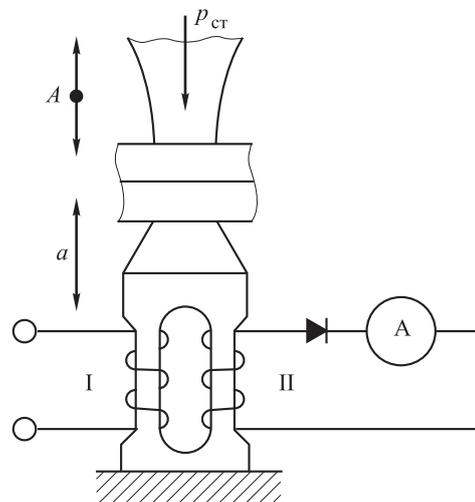


Рис. 4. Схема магнитоупругого датчика

мальных температур в шве и соответствует температурам перехода ПМ в эластическое, а затем в вязкотекучее состояние. При этом значение сигнала датчика амплитуды колебаний опоры возрастает от начального $a_{\text{нач}}$ до максимального a_{max} , соответствующего началу перехода ПМ в вязкотекучее состояние. В дальнейшем наблюдается рост температуры в сварном шве с одновременным возрастанием осадки ПМ в зоне соединения, т. е. фактическое увеличение площади контакта свариваемых поверхностей вплоть до полного заполнения технологического зазора — предварительной разделки кромок. При последующем повышении температуры в сварном стыке значения a снижаются до a_{min} , что соответствует области максимальных температур в зоне сварного стыка.

Для определения зависимости механической прочности сварных соединений от амплитуды a , т. е. от кинетической характеристики процесса, проводили испытания на растяжение

образцов, сваренных при продолжительности ультразвукового импульса, соответствующей различным значениям кинетической характеристики. При этом было установлено, что максимальной прочностью сварного соединения соответствует область кинетической характеристики с минимальным значением a_{min} . Максимальная прочность соединений, полученных при последовательно-ступенчатой концентрации энергии ультразвуковых колебаний, вследствие более высоких температур сварки превышает прочность сварных соединений, полученных с V-образной разделкой кромок. Таким образом, оптимальная продолжительность ультразвукового сварочного импульса при сварке стыковых соединений определяется временем, за которое амплитуда колебаний опоры изменяется от $a_{\text{нач}}$ до a_{min} .

При сварке мягких полимеров большой толщины (для полиэтилена — более 1,5 мм) вследствие особенностей тепловыделения достижение минимального значения a_{min} датчика свидетельствует лишь об образовании максимально разогретой области полимера. Только в том случае, если эта область оказывается непосредственно на границе раздела свариваемых элементов, появление сигнала a_{min} свидетельствует об образовании сварного соединения. Поэтому применять схему сварки с ограничением продолжительности сварочного импульса по кинетической характеристике можно для мягких термопластов толщиной примерно 1,5 мм, а для жестких — до толщин, обеспечивающих совпадение максимально разогретой зоны с границей разделки свариваемых кромок (см. рис. 3).

С помощью термографирования определена зависимость температуры в зоне соединения при сварке различных ПМ от их толщины и режима работы. Установлено, что минимальное значение кинетической характеристики a_{min} соответствует максимальной температуре на границе свариваемых поверхностей при сварке полимеров следующих толщин: до 100 мм при коэффициенте затухания $\alpha < 0,35 \text{ см}^{-1}$ (полиметилметакрилат); 10...70 мм при $\alpha = 0,35...0,55 \text{ см}^{-1}$ (полистирол, винипласт); 0,5...3,0 мм при $\alpha > 0,35 \text{ см}^{-1}$ (полиэтилен, полипропилен).

При УЗС полимеров сопутствующий контроль позволяет обеспечить стабильное получение высококачественных сварных соединений при возможной нестабильности как ПМ, так и работы ультразвукового генератора.

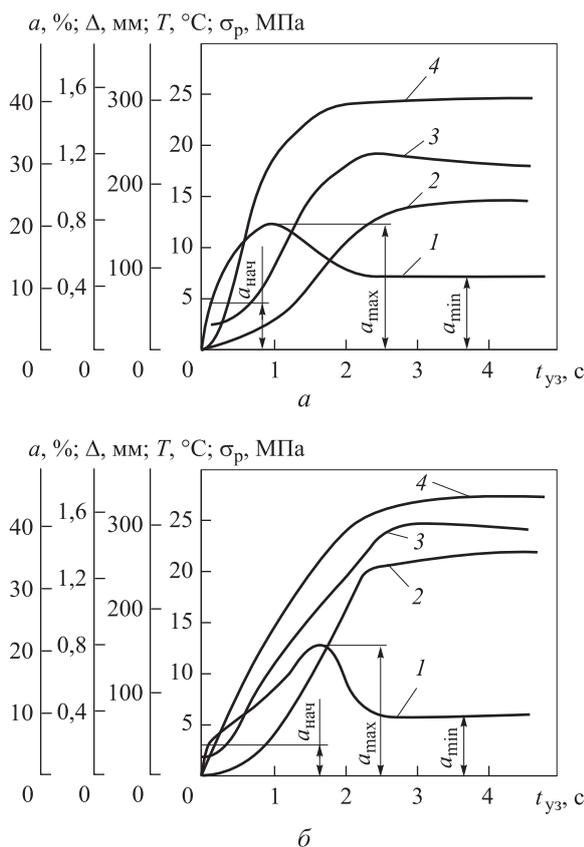


Рис. 5. Взаимосвязь между кинетической характеристикой a (1), прочностью сварного соединения σ_p (2), средней температурой T (3) и осадкой ПМ в зоне сварного стыка Δ (4) при разделке кромок образцов: a — V-образной; b — для последовательно-ступенчатой концентрации энергии ультразвуковых колебаний

Наиболее типичный случай нарушения режима — отклонение частоты генератора от частоты магнитострикционного преобразователя. Следствием этого является уменьшение амплитуды колебаний волновода, приводящее к тому, что оптимальное время сварки должно быть увеличено. В случае нарушения настройки генератора максимальная температура в шве достигается за более длительное время, поскольку точка выхода кинетической характеристики как бы растягивается.

Сопутствующий контроль можно проводить с помощью прибора для визуального контроля сварки. Для наблюдения за кинетическими характеристиками параллельно индикатору подсоединяют осциллографы. Описанные свойства кинетической характеристики обусловили применение метода сопутствующего контроля по ней в двух вариантах — ручном и автоматическом. Первый применяют при сварке часто изменяемой номенклатуры изделий. Сварщик-оператор по показанию индикатора (микроамперметра) наблюдает за изменением кинетической характеристики и, когда сигнал датчика принимает минимальное значение, отключает ультразвук.

Второй вариант используют при сварке крупных партий изделий. Автоматическое устройство для отключения ультразвука срабатывает при заранее заданном уровне сигнала, соответствующем значению a_{\min} .

Для автоматического управления временем сварки на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны приборы УВС-2 и УВС-4, которые так же, как и блоки визуального контроля, выполнены в виде переносных блоков-приставок к ультразвуковым сварочным машинам.

Выводы

1. Сопутствующий контроль, или контроль процесса УЗС по кинетической характеристике, обеспечивает стабильное получение высококачественных сварных соединений при возможной нестабильности физического состояния ПМ, работы ультразвукового генератора и акустической системы.

2. При УЗС различных пластмасс кинетическая характеристика отражает физическое состояние полимера в зоне сварного соединения и определяет оптимальную продолжительность ультразвукового импульса, за которую сигнал датчика изменяется от $a_{\text{нач}}$ до a_{min} , вследствие чего может быть применена для контроля качества сварных соединений.

3. Предложенный метод неразрушающего сопутствующего контроля по кинетической характеристике используется при разработке ультразвукового сварочного оборудования.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, no. 18(3), pp. 242–245.
- [3] Алешин Н.П. *Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений*. Москва, Машиностроение, 2013. 576 с.
- [4] Иванов В.И., Бигус Г.А., Власов И.Э. *Акустическая эмиссия*. Москва, Спектр, 2011. 192 с.
- [5] 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.
- [6] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Welding International*, 2008, no. 22(3), pp. 193–197.
- [7] Маслов Б.Г. *Неразрушающий контроль сварных соединений и изделий в машиностроении*. Москва, Академия, 2008. 272 с.
- [8] Алешин Н.П., Чернышов Г.Г. *Сварка. Резка. Контроль: справочник*. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2004. 624 с.
- [9] 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.
- [10] Щербинский В.Г. *Технология ультразвукового контроля сварных соединений*. Москва, Тиссо, 2005. 326 с.

References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and gluing of plastics]. Moscow, Khimiia publ., 2001. 376 p.
- [2] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, no. 18(3), pp. 242–245.
- [3] Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushaiushchego kontrolya svarnykh soedinenii* [Physical methods for non-destructive testing of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2013. 576 p.
- [4] Ivanov V.I., Bigus G.A., Vlasov I.E. *Akusticheskaia emissiia* [Acoustic emission]. Moscow, Spektr publ., 2011. 192 p.
- [5] 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.
- [6] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Welding International*, 2008, no. 22(3), pp. 193–197.
- [7] Maslov B.G. *Nerazrushaiushchii kontrol' svarnykh soedinenii i izdelii v mashinostroenii* [Non-destructive testing of welded joints and products in mechanical engineering]. Moscow, Akademiia publ., 2008. 272 p.
- [8] Aleshin N.P., Chernyshov G.G. *Svarka. Rezka. Kontrol': spravochnik* [Welding. Cutting. Control: A Handbook]. Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. 624 p.
- [9] 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.
- [10] Shcherbinskii V.G. *Tekhnologiia ul'trazvukovogo kontrolya svarnykh soedinenii* [The technology of ultrasonic testing of welded joints]. Moscow, Tisso publ., 2005. 326 p.

Статья поступила в редакцию 02.11.2016

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: map@bmstu.ru).

ДЕРЯБИН Алексей Александрович (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: aad1_2000@mail.ru).

ХОЛОДОВ Сергей Сергеевич (Москва) — зав. лабораторией. ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, e-mail: holodovs@mail.ru).

Information about the authors

VOLKOV Stanislav Stepanovich (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: map@bmstu.ru).

DERYABIN Aleksey Aleksandrovich (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: aad1_2000@mail.ru).

KHOLODOV Sergey Sergeevich (Moscow) — Head of Laboratory. Federal State Autonomous Institution Research and Educational Centre for Welding and Control at Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, e-mail: holodovs@mail.ru).