

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-53-58

Влияние шероховатости свариваемых поверхностей на качество их соединения при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс

С.С. Волков, М.А. Прилуцкий

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

The Influence of the Roughness of the Welded Surfaces on the Quality of the Weld when using Ultrasonic Welding of Heterogeneous Plastic Materials

S.S. Volkov, M.A. PrilutskiyBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: map@bmstu.ru

i Для повышения прочности сварного соединения за счет снижения термодеструкции более легкоплавкого полимера предложено применить промежуточную прокладку из материала, значения свойств которого лежат в интервале значений основных материалов. Установлено, что одним из факторов, определяющих прочность сварного соединения и обеспечивающих работоспособность композиции из разнородных полимеров с промежуточной термопластичной прокладкой, является шероховатость поверхностей, причем не только основных элементов композиции, но и промежуточной прокладки. Регулируя ее, можно варьировать толщины свариваемых композиций и тепловыделение в зоне шва, не изменяя технологических параметров сварки. Показана специфика ультразвуковой сварки разнородных термопластов. Экспериментально подтверждено, что одним из критериев свариваемости разнородных термопластов является их совместимость по акустическим свойствам, оцениваемая плотностью и вязкостью. Предложены технологические способы, позволяющие компенсировать различия в акустических свойствах свариваемых материалов и тем самым получать качественные сварные соединения. Определены три стадии механизма образования сварных соединений при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс. Разработана ультразвуковая сварочная машина, включающая в себя специальные устройства для сварки разнородных пластмасс. К ним относятся устройства для ступенчатого изменения режима сварки, регулирования температуры опоры и волновода, нагрева или охлаждения различных зон свариваемых изделий.

Ключевые слова: шероховатость, разнородные полимеры, ультразвуковая сварка, амплитуда, давление.

i To increase the strength of the weld through reducing thermal degradation of the polymer with a lower melting point, it is proposed to use an interleaf layer made of the material whose properties lie in the range of values of basic materials. It is established that one of the factors that determine the strength of the weld and ensure the performance of a heterogeneous polymer composite with a thermoplastic interleaf, is the roughness of the surfaces. It applies not only to the main components of the composite but to the interleaf as well. Adjusting the latter, it is possible to vary the thickness of the welded composites and heat dissipation in the weld area without changing the technological parameters of the

welding. Specific features of ultrasonic welding of heterogeneous thermoplastic materials are shown. It has been experimentally confirmed that one of the criteria for weldability of heterogeneous thermoplastic materials must be their compatibility in terms of acoustic properties assessed through density and viscosity. The authors propose technological methods to compensate for variations in the acoustic properties of the welded materials and thus produce high-quality welds. Three stages of the weld formation mechanism are identified when welding heterogeneous plastic materials by ultrasonic welding. An ultrasonic welding machine is developed that incorporates special devices for welding heterogeneous plastics. These include devices for step change of the welding mode, adjusting the temperature of the support and waveguide, heating or cooling of different zones of the welded products.

Keywords: roughness, heterogeneous polymers, ultrasonic welding, amplitude, pressure.

Увеличение производства полимерных материалов по объему и номенклатуре, расширение областей их применения стимулируют развитие исследований, направленных на создание новых технологий изготовления изделий из пластмасс. При их конструировании используются ярко выраженные специфические свойства полимерных материалов.

Однако для многих конструкций требуется такое сочетание свойств, которое не могут обеспечить отдельно взятые полимерные материалы, например, в полевой измерительной аппаратуре — температуро- и атмосферостойкость, высокая сопротивляемость ударным нагрузкам; в спецодежде — теплостойкость и гигиенические характеристики; в осветительной арматуре транспорта — прочность и прозрачность. Возникает необходимость создания изделий из нескольких полимерных материалов, полезные свойства которых в совокупности удовлетворяют предъявляемым требованиям. Поэтому соединение заготовок из разнородных полимерных материалов является актуальной проблемой. Сложность соединения обусловлена различием теплофизических, механических и электрических свойств соединяемых материалов.

Ультразвуковая сварка (УЗС) является одним из методов соединения термопластичных полимерных материалов. Различие в акустических свойствах свариваемых термопластов затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным использование УЗС без применения специальных технологических способов [1].

Такой вид сварки возможен при известных условиях передачи акустической энергии к зоне сварки и тепловыделения на границе раздела свариваемых материалов. Определение влияния конкретных технологических параметров на эти процессы позволяет в большей мере

учитывать различия в свойствах свариваемых материалов.

Одним из параметров, влияющих как на передачу акустической энергии к зоне сварки, так и на тепловыделение на границе раздела заготовок, является их толщина. В связи с этим важно определить целесообразную очередность расположения свариваемых разнородных пластмасс под волноводом в зависимости от толщины заготовок и акустических свойств материалов.

Свариваемость разнородных материалов также имеет большое значение. Поскольку сварное соединение двух полимерных разнородных материалов не всегда получается качественным [1–3], необходимо подобрать третий полимер, хорошо свариваемый как с первым, так и со вторым материалом.

В работе рассмотрена УЗС разнородных полимерных материалов с термопластичной прокладкой между ними, решены задачи выбора технологических параметров и схемы сварки, вида и размеров материалов и т. д., исследовано влияние шероховатости свариваемых поверхностей на качество их соединения.

Существуют различные гипотезы о тепловых процессах, происходящих при УЗС. Особенно велики расхождения в описаниях физических процессов преобразования энергии механических колебаний в тепловую для мягких пластмасс. По мнению авторов работ [1, 2], при сварке мягких пластмасс и волокнистых материалов теплота выделяется во всем объеме зоны сварки вследствие гистерезисных потерь при циклическом деформировании вязкоупругого материала. Процессы, происходящие на границе раздела, существенно не влияют на теплообразование. Авторы работы [4] основным источником теплоты считают внешнее трение в контакте *полимер–полимер*,

вызываемое поперечными деформациями материала в этой зоне.

По свариваемости полимерные материалы подразделяют на две группы: хорошо сваривающиеся (полиэтилентерефталатные, полиамидные, поликарбонатные и полипропиленовые) и плохо сваривающиеся (поливинилхлоридные и полиэтиленовые) [1, 5, 6].

При сварке жестких пластмасс с малым коэффициентом затухания ультразвуковых колебаний разогрев происходит преимущественно на границе раздела свариваемых деталей. Последние контактируют по микронеровностям, не сминаемым при приложении статического давления вследствие большого модуля упругости. Поскольку реальная площадь контакта мала, на границе раздела деталей возникают значительные динамические напряжения. Скорость нагрева пропорциональна амплитуде последних, поэтому происходит преимущественный разогрев микронеровностей, их оплавление, растекание полимера по поверхности раздела деталей под действием статического давления и образование соединения. Граница раздела оказывается в благоприятных условиях вследствие естественного уменьшения реальной площади контакта. Таким образом, прочность сварного соединения возрастает с увеличением шероховатости [7].

Рассмотрим влияние шероховатости свариваемых поверхностей на качество их соединения при УЗС разнородных полимерных материалов с мягкими термопластичными прокладками между ними. Контакт реальных поверхностей всегда дискретен. Величина площади фактического контакта и кинетика ее формирования определяются механическими свойствами свариваемых материалов и геометрией поверхностей. Площадь фактического контакта определяется пределом текучести по формуле

$$S = \frac{N}{\sigma_T}, \quad (1)$$

где N — нормальная нагрузка; σ_T — предел текучести более мягкой пары при УЗС разнородных полимерных материалов.

В работах [1, 2, 8] был сделан вывод о том, что процесс формирования площади контакта зависит от нормального давления и размера шероховатости полимера. Не учитывая форму и размер последней, считаем, что микрошеро-

ховатости хаотически распределены по поверхности полимера. При трении в зоне контакта двух материалов различной жесткости коэффициент трения определяется, как правило, усилием на срез более мягкого материала. Примем условие, что у более жесткого полимера размеры шероховатости поверхности значительно меньше, чем у мягкого, и рассмотрим контакт этих полимеров с точки зрения вероятности соприкосновения их шероховатостей [9].

Когда поверхность более жесткого тела идеально гладкая, т. е. площадь фактического контакта равна геометрической площади сварного шва ($S = S_c$), вероятность соприкосновения шероховатости более мягкого тела с микронеровностями свободной поверхности более жесткого тела равна нулю. В реальном случае контакт шероховатостей произойдет, т. е. вероятность равна единице. Следовательно, вероятность образования контакта между двумя микронеровностями пропорциональна свободной поверхности $(1 - \varphi)$, где $\varphi = S/S_c$ — относительная площадь контакта. Скорость изменения площади фактического контакта определяется выражением

$$\frac{d\varphi}{dp} = \alpha(1 - \varphi), \quad (2)$$

где α — постоянная, зависящая от шероховатости полимера и его упругих свойств.

Предположим в первом приближении, что

$$\alpha = \frac{\beta}{E}, \quad (3)$$

где β и E — коэффициент шероховатости и модуль упругости более мягкого полимера соответственно.

Тогда из выражения (2) имеем

$$\varphi = 1 - (1 - \varphi_0) \exp\left(-\frac{\beta}{E} p\right), \quad (4)$$

где $\varphi_0 = S_0/S$, S_0 — площадь фактического контакта при нулевом нормальном давлении.

Существование площади S_0 объясняется как своеобразием упругих свойств полимеров, так и наличием сил адгезии между поверхностями. Выражение (4) удовлетворяет следующим предельным условиям: при $p \rightarrow \infty$ $S \rightarrow S_c$ и при $p \rightarrow 0$ $S \rightarrow S_0$.

Рассмотрим физический смысл коэффициента шероховатости β . У абсолютно гладких и плоскопараллельных поверхностей площадь контакта при любых нормальных нагрузках равна

геометрической площади, что соответствует $\beta = \infty$. При сильно выраженной шероховатости контакт образуется только в немногих точках поверхности, поэтому площадь фактического контакта S и коэффициент шероховатости β будут относительно малы. В результате выражение (4) преобразуется к следующему виду:

$$\varphi = \varphi_0 + (1 - \varphi_0) \frac{\beta}{E}. \quad (5)$$

При $\varphi_0 = 0$ из выражения (5) имеем

$$\varphi = \frac{\beta}{E}. \quad (6)$$

Процесс формирования площади контакта, характеризуемый этим выражением, заключается в увеличении числа контактов при неизменном их размере.

Площадь фактического контакта с учетом формулы (6) $S = S_c(\beta/E)$ приравняем к площади, определяемой выражением (1):

$$\frac{N}{\sigma_T} = S_c \frac{\beta}{E}. \quad (7)$$

Преобразовав формулу (7), получим

$$\frac{N}{S_c \beta} = \frac{\sigma_T}{E}. \quad (8)$$

Амплитуду колебаний при УЗС определим из выражения

$$A = l \frac{\sigma_T}{E}, \quad (9)$$

где l — участок прохождения ультразвука в полимере.

Сравнивая выражения (8) и (9), получим зависимость, связывающую амплитуду колебаний при УЗС с шероховатостью поверхности более мягкого полимера:

$$A = \frac{N}{\beta} \frac{l}{S_c}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что увеличение числа слоев l можно компенсировать, увеличивая шероховатость без изменения амплитуды прикладываемых ультразвуковых колебаний. Поскольку удельная мощность теплообразования при УЗС полимеров является функцией квадрата амплитуды колебаний, изменяя степень шероховатости, можно регулировать тепловыделение в зоне шва [10].

Для обеспечения процесса УЗС необходимо, чтобы свариваемый полимерный материал в

зоне сварного шва находился в вязкотекучем состоянии. Известно, что физическое состояние различных материалов на последней стадии сварки одинаково. Однако на начальной стадии сварки (температура которой составляет 20 °С) различные пластмассы находятся в неодинаковом физическом состоянии, что привело к их разделению на два класса: жесткие и мягкие. Это вызвало трудности в выборе механизма теплообразования [10].

По мнению авторов статьи, необходимо учитывать физическое состояние пластмасс, поскольку на различных его стадиях механизм теплообразования неодинаков. Предлагается разделить процесс УЗС на три стадии, которые характерны для трех физических состояний пластмасс (применительно к аморфным полимерам: стеклообразным, высокоэластичным и вязкотекучим). *На первой стадии* выделение тепла происходит за счет суммарного эффекта от внешнего трения, разогрева границы раздела как места наибольшего скопления пустот и неплотностей циклического деформирования микровыступов, по которым контактируют поверхности свариваемых элементов. *На второй стадии*, когда разморожена сегментальная подвижность, тепловыделение обусловлено изменением конформаций молекул за счет циклического деформирования. *Третья стадия*, когда полимер находится в вязкотекучем состоянии, характеризуется процессами течения расплава; диффузии и перемешивания как отдельных сегментов, так и блоков макромолекул полимеров.

Механизм теплообразования зависит от физического состояния полимера к моменту начала сварки. Так, при температуре начала сварки 20 °С для полистирола или полиметилметакрилата характерны все три стадии УЗС, а для полиэтиленовых или полиэтилентерефталатных пленок первая стадия отсутствует. Если же полиэтиленовую пленку охладить в жидком азоте, то и для нее будут характерны все три стадии сварки, что было подтверждено экспериментально.

Такой механизм образования сварного соединения при УЗС разнородных полимерных материалов служит основанием для создания новых технологических способов сварки, позволяющих исключить влияние различия физико-механических свойств свариваемых пластмасс.

Технологические способы, позволяющие получать качественные сварные соединения разнородных пластмасс, заключаются в подборе свариваемых пар; определении температуры

нагрева, при которой каждый из свариваемых материалов имеет оптимальную текучесть в зоне шва; использовании промежуточных прослоек (прокладок) из сополимеров, имеющих в своем составе мономерные звенья обоих свариваемых полимеров; создании шероховатостей поверхностей.

На основании результатов исследований сварки разнородных пластмасс разработана ультразвуковая сварочная установка, включающая в себя специальные устройства, обеспечивающие выполнение выбранных технологических способов и исключение влияния различия физико-механических свойств свариваемых материалов. К ним относятся устройства для ступенчатого изменения режима сварки, регулирования температуры опоры и волноводов, нагрева или охлаждения различных зон свариваемых деталей.

Выводы

1. Показана специфика УЗС разнородных термопластов. Предложены технологические способы, позволяющие компенсировать различия в акустических свойствах свариваемых материалов.

2. Установлено, что одним из факторов, определяющих прочность сварного соединения и обеспечивающих работоспособность композиции из разнородных полимеров с промежуточной термопластичной прокладкой, является шероховатость поверхностей, причем не только основных элементов композиции, но и промежуточной прокладки. Регулируя ее, можно варьировать толщины свариваемых композиций и тепловыделение в зоне шва, не изменяя технологических параметров сварки.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С., Соколов В.А., Шестель Л.А. Технология и оборудование для сварки эластичных емкостей из пленочного фторопласта-4МБ. *Сварка и диагностика*, 2013, № 3, с. 52–55.
- [3] Люшинский А.В. *Диффузионная сварка разнородных материалов*. Москва, Академия, 2006. 208 с.
- [4] Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Королева Ю.П., Михеев А.А., Прокопьев С.В. Диффузионная сварка через промежуточные прослойки. *Сварочное производство*, 2012, № 7, с. 17–22.
- [5] Volkov S.S. Dependence of the breaking force of non-woven fabrics on weld pitch in ultrasonic welding. *Welding International*, 2005, № 19(8), pp. 665–668.
- [6] Волков С.С. Технологические особенности сварки разнородных пластмасс. *Сварочное производство*, 2007, № 5, с. 38–43.
- [7] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, № 18(3), pp. 242–245.
- [8] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Welding International*, 2008, № 22(3), pp. 193–197.
- [9] Алешин Н.П., Чернышов Г.Г. *Сварка. Резка. Контроль: справочник. В 2 т.* Москва, Машиностроение, 2004. Т. 1. 624 с.
- [10] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 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., Sokolov V.A., Shestel' L.A. Tekhnologiya i oborudovanie dlia svarki elastichnykh emkosteii iz plenochnogo ftoroplasta-4MB [Technology and equipment for welding of flexible containers from a film of PTFE-4MB]. *Svarka i diagnostika* [Welding and diagnostics]. 2013, no. 3, pp. 52–55.
- [3] Liushinskii A.V. *Diffuzionnaia svarka raznorodnykh materialov* [The diffusion welding of dissimilar materials]. Moscow, Akademiia publ., 2006. 208 p.
- [4] Zeer G.M., Zelenkova E.G., Koroleva Iu.P., Mikheev A.A., Prokop'ev S.V. Diffuzionnaia svarka cherez promezhutochnye prosloiki [Diffusion welding through intermediate layers]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2012, no. 7, pp. 17–22.

- [5] Volkov S.S. Dependence of the breaking force of non-woven fabrics on weld pitch in ultrasound welding. *Welding International*, 2005, no. 19(8), pp. 665–668.
- [6] Volkov S.S. Tekhnologicheskie osobennosti svarki raznorodnykh plastmass [Primary processes and features of heterogeneous plastics welding]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2007, no. 5, pp. 38–43.
- [7] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Welding International*, 2004, no. 18(3), pp. 242–245.
- [8] Volkov S.S. Main methods and technological features of welding dissimilar plastics. *Welding International*, 2008, no. 22(3), pp. 193–197.
- [9] Aleshin N.P., Chernyshov G.G. *Svarka. Rezka. Kontrol': spravochnik* [Welding. Cutting. Control: guide]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004. Vol. 1. 624 p.
- [10] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Peterburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2013. 646 p.

Статья поступила в редакцию 17.11.2015

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).

ПРИЛУЦКИЙ Максим Андреевич (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: map@bmstu.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: map@bmstu.ru).

PRILUTSKIY Maxim Andreevich (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).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
А.Б. Красовского

«Основы электропривода»

Кратко изложены основы теории современного автоматизированного электропривода. Рассмотрены принципы построения и составные части электроприводов, их характеристики в статических и динамических режимах работы с двигателями постоянного и переменного тока, а также основные принципы управления и проектирования.

Учебное пособие ориентировано прежде всего на студентов вузов неэлектротехнических специальностей, поэтому в отличие от большинства книг по основам электропривода, содержит дополнительные разделы по общим вопросам электромеханического преобразования энергии, принципам работы и особенностям конструкции основных типов электрических машин, силовой электронике.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru