

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПОЛИМЕРОВ

<sup>1</sup>В.В. Клубович, <sup>1</sup>В.А. Клушин,  
<sup>1</sup>В.И. Марусич, <sup>1</sup>Е.В. Хрущёв

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

*Приводятся результаты исследований возможности ультразвуковой сварки некоторых полимерных материалов, изготавливаемых в Республике Беларусь и Российской Федерации. Установлено влияние увеличения шероховатости поверхности свариваемых поверхностей на качество сварного соединения за счет концентрации напряжений в зоне сварки.*

**Ключевые слова:** ультразвуковая сварка, полимер, свариваемость, технологические режимы, шероховатость

## ULTRASONIC POLYMER WELDING

<sup>1</sup>V.V. Klubovich, <sup>1</sup>V.A. Klushin,  
<sup>1</sup>V.I. Marusich, <sup>1</sup>E.V. Khrushchov

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University,  
Minsk, Republic of Belarus

*The results of investigations of the possibility of ultrasonic welding of some polymer materials manufactured in the Republic of Belarus and the Russian Federation are presented. The effect of an increase in the surface roughness of the welded surfaces on the quality of the welded joint due to stress concentration in the weld zone is established.*

**Keywords:** ultrasonic welding, polymer, weldability, technological regimes, roughness

**E-mail:** nil\_p@bntu.by

Ультразвуковая сварка (УЗС) полимеров — это один из наиболее перспективных способов получения неразъемных соединений, получивший в последние годы большое развитие, как в нашей стране, так и за рубежом.

С помощью ультразвука можно сваривать как однородные, так и разнородные материалы различной толщины. Свариваемость отдельных видов полимерных материалов зависит от физико-механических свойств материалов, от содержания в них наполнителей, а также от размеров свариваемых заготовок, способа их изготовления и др. Оптимальное время сварки для каждого вида изделия определяется при отработке технологических режимов. Время ультразвукового воздействия от долей секунды до нескольких секунд.

При УЗС полимеров электрические колебания ультразвуковой частоты, вырабатываемые генератором, преобразуются в механические колебания сварочного инструмента — волновода и вводятся в свариваемый материал, при этом часть энергии механических колебаний переходит в тепловую энергию локальной направленности, происходит нагрев зоны контакта свариваемых деталей до температур вязкотекучего состояния.

Вначале сварки образуется физический контакт поверхностей и происходит активация полимерных молекул за счет разрыва химических связей, затем начинается химическое взаимодействие соединяемых материалов, переходящее в объемное взаимодействие в зоне соединения. При температурах высокоэластичного состояния полимера происходит диффузия отдельных сегментов макромолекул свариваемых полимеров, а в некоторых случаях — и перемешивание вязкотекучего полимерного материала. При соединении двух термопластов различных марок возникают химические превращения.

Основной целью настоящих исследований являлось установление возможности сваривания группы полимерных материалов (табл. 1), изготавливаемых в Республике Беларусь и Российской Федерации. Определение оптимальных режимов УЗС полимеров одной марки, в том числе с разной шероховатостью поверхности, полимеров разных марок одного класса и разнородных полимеров.

Предметом исследования были образцы в виде пластин с поперечным сечением 10×4 мм и длиной 100 мм, полученных экструзией из расплава следующих полимеров: полиэтилены низкой и высокой плотности (ПЭНП и ПЭВП, соответственно), полипропилен (ПП), полиамиды (ПА6 и ПА66) и полиэтилентерефлат (ПЭТ).

Одним из критериев свариваемости разнородных термопластов является их совместимость по акустическим свойствам. Акустические свойства полимерных материалов определяются их механическими свойствами, такими как: плотность, вязкость, модуль упругости и коэффициентом затухания (погашения) колебаний.

**Табл. 1**

**Физико-механические характеристики исследуемых полимеров**

Полимер	Сокр. назв. Марка	$T_{пл.} \text{ } ^\circ\text{C}$	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	$E$ , 10 <sup>3</sup> МПа	Скор. распр. волн с, м/с	Интен-сив. зву-ковых коле-баний $I$ , Вт/см <sup>2</sup>	Произ-водитель
Полиэтилен низкой плотности	ПЭНП 109	109 102–105	920 910–930	—	0,2 0,15– 0,24	150	61	Полимир, ОАО «Нафтан»
Полиэтилен высокой плотности	ПЭВП 277	127 125–138	950 940–960	—	0,8 0,55–1,0	293	122	ОАО «Ставролен», РФ
Полипропилен	ПП 21030	165 165–170	910 900–920	—	1,5 1,2–1,7	410	164	Уфа оргсин-тез
Полиамид 6	ПА6 210/310	220	1130 1100–1150	100–120	1,4 1,2–1,5	355	177	Гродно Азот
Полиамид 66	ПА66 210/310	267	1140	90–95	—	—	—	Полипластик, РФ
Полиэтилентерефлат	ПЭТ 8200	253	1050 1020–1080	10–30	2,3 1,7–2,9	473	218	Химволокно, Могилев

В зависимости от вязкоупругих свойств различают жесткие, полужесткие и мягкие пластмассы.

Жесткие пластмассы — это твердые, упругие материалы аморфной структуры, имеющие модуль упругости более 1–10 ГПа. Они хрупко разрушаются с незначительным удлинением при разрыве. Примерами жестких пластмасс являются фенопласты, аминопласты, глифталевые полимеры. В нашем случае к жестким пластмассам относится полиэтилентерефлат.

Полужесткие пластмассы — это твердые вязкоупругие материалы кристаллической структуры, имеющие модуль упругости более 400 МПа и высокое относительное удлинение при разрыве. Остаточные деформации их обратимы и полностью исчезают при нагревании. Примерами служат полипропилен и полиамиды.

Для мягких пластмасс характерны низкий модуль упругости (20...100 МПа) и высокое относительное удлинение при разрыве. Остаточные деформации обратимы и медленно исчезают при нормальной температуре. К таким пластмассам относятся поливинилацетат, полиэтилен и др.

Для сравнительной оценки акустических свойств полимерных материалов выполняли расчеты скоростей и интенсивности распространения продольных волн (табл. 1), а также оценили влияние механических свойств материалов и параметров колебательной ультразвуковой системы на затухание (погашение) колебаний по рекомендациям авторов [1, 2].

Скорость распространения продольных волн в упругом твердом материале определяли по формуле:

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль упругости материала стержня;  $\rho$  — его плотность.

Из уравнений (1) видно, что скорость продольных ультразвуковых волн зависит от плотности и упругих констант полимеров.

Интенсивность звуковых колебаний для плоской волны, в которой форма и площадь поверхности волнового фронта не изменяются, можно определить по формулам:

$$I = 2 \pi^2 \cdot \rho \cdot c \cdot f^2 \cdot A^2, \quad (2)$$

или

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c}, \quad (3)$$

где  $f$  — частота колебаний,  $A$  — амплитуда колебаний,  $P_A$  — амплитуда звукового давления

Амплитуда звукового давления

$$P_A = \rho \cdot c \cdot \omega \cdot A. \quad (4)$$

Произведение плотности среды на скорость распространения звука  $\rho c$  определяет акустическое сопротивление полимерного материала прохождению ультразвуковой продольной волны.

Таким образом, интенсивность звука прямо пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления и обратно пропорциональна волновому сопротивлению среды.

Коэффициент затухания (поглощения) энергии звуковой волны характеризуется падением интенсивности звука и зависит от вязкости и теплопроводности свариваемых пластмасс. Значения коэффициентов затухания материалов прямо пропорциональны коэффициентам вязкости и теплопроводности и квадрату частоты [2].

Коэффициенты затухания, обусловленные вязкостью  $\alpha_1$  и теплопроводностью  $\alpha_2$ , определяют по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{2\eta\omega^2}{3\rho c^2};$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi^2 K}{\lambda^2 \rho c c_p} \left( \frac{c_p}{c_v} - 1 \right), \quad (5)$$

где  $\eta$  — коэффициент вязкости,

$K$  — коэффициент теплопроводности,

$c_v, c_p$  — удельные теплоемкости при постоянном объеме и давлении,

Исследования проводили на экспериментальной установке для ультразвуковой сварки полимеров конструкции Института технической акустики НАН Беларуси, включающей генератор ультразвуковых колебаний, пневматический пресс с пьезокерамическим преобразователем колебаний и волноводом-концентратором (пуансоном-волноводом) и компрессор (рис. 1).

Пьезокерамический преобразователь смонтирован на ползуне прессы и подключается к ультразвуковому генератору. Необходимое усилие прижима обеспечивается пневмосистемой прессы, в которой источником сжатого воздуха служит компрессор.

Преобразователь колебаний, волновод, пуансон-волновод установлены в составных частях волноводного звена с акустической развязкой колебательной системы от корпуса установки. Составные части жестко закрепляются на ползуне прессы.



Рис. 1. Экспериментальная установка для ультразвуковой сварки полимеров: а — генератор ультразвуковых колебаний; б — пневматический пресс с пьезокерамическим преобразователем и пуансоном-волноводом; в — компрессор

Ультразвуковая колебательная система, включающая преобразователь колебаний, пуансон-волновод, матрицу, отражатель, свариваемые заготовки, составлена из резонансных, кратных полуволне звеньев с расположением очага деформаций в пучности смещений.

Рабочий цикл сварки определяется последовательностью приложения статического давления  $P_{ст}$ , включения и прохождения ультразвукового импульса, выдержки изделия под давлением и снятия давления с последующим удалением сварного соединения из матрицы.

Установка ультразвуковой сварки полимеров работает следующим образом. В исходном положении, когда ползун прессы находится в крайнем верхнем положении, производят укладку свариваемых заготовок в матрицу (на опору), после чего включают рабочий цикл ультразвуковой сварки.

Статическое давление  $P_{ст}$  на свариваемые заготовки осуществляют при рабочем ходе ползуна прессы до включения ультразвуковых колебаний.

Затем включают генератор ультразвуковых колебаний, который вырабатывает электрические колебания ультразвуковой частоты 20–50 кГц, преобразуемые ультразвуковой колебательной системой в механические колебания пуансона-волновода и вводятся в свариваемый материал. Часть энергии механических колебаний переходит в тепловую энергию, что приводит к нагреву зоны контакта соединяемых деталей до температур вязкотекучего состояния.

Сварку образцов производили внахлест на длине 30 мм, что было связано с размерами концентратора. Основные параметры ультразвуковой сварки в процессе проведения исследований: амплитуда колебаний рабочего торца волновода  $A = 23,6$  мкм; частота колебаний  $f = 22$  кГц  $\pm 10$  %; продолжительность ультразвукового импульса  $t = 3$  с; сварочное статическое давление  $P_{ст} = 5–6$  Бар, усилие прижатия волновода к материалу  $F = 50$  Н; выдержка свариваемого изделия под давлением 1–10 с; вводимая энергия 800–1600 Вт·с.

Результаты исследований показали, что свариваемость полимеров ультразвуком определяется их физико-механическими свойствами при температуре сварки, а так же состоянием поверхности свариваемых полимеров (табл. 2).

Табл. 2

### Свариваемость различных полимеров

	ПЭНП 109	ПЭВП 277	ПП 21030	ПА6 210/310	ПА66 210/310	ПЭТ 8200
ПЭНП 109	+	+	+	–	–	–
ПЭВП 277	+	+	+	–	–	–
ПП 21030	+	+	+	+	+	–
ПА6 210/310	–	–	+	+	+	+
ПА66 210/310	–	–	+	+	+	+
ПЭТ 8200	–	–	–	+	+	+

\*(знак «+» – полимеры свариваются)

На первом этапе исследований производили сварку полос без предварительной обработки свариваемых поверхностей.

В результате удалось сварить лишь однородные (одноименные) полимеры, кроме ПЭНП, а так же ПА6 с ПА66 и с ПЭТ и ПП с ПЭВП.

При дальнейших исследованиях изучали влияние шероховатости поверхностей на свариваемость образцов. Изменение шероховатости свариваемых поверхностей путем нанесения точечных или вафельных рифлений значительно расширяет технологические возможности УЗС.

Однако нанесение точечных или вафельных рифлений достаточно трудоемкий процесс, требующий использования специальных штампов.

Нами был предложен способ сварки, при котором на свариваемую поверхность нижней пластины насыпают частицы (крошку) полимера с невысокой температурой плавления для создания искусственных концентраторов напряжения заменяющих

увеличение шероховатость поверхности. В наших экспериментах частицы полимера объемом до 2 мм<sup>3</sup> получали рубкой из одного из свариваемых материалов.

Использование частиц (крошки) полимера ПЭНП позволило осуществить сварку образцов одноименных полимеров ПЭНП, а так же образцов из разнородных полимеров ПЭНП с ПЭВП и с ПП (табл. 2, обозначение – «+\*»).

При сварке полужестких полимеров ПП и ПА6, близких по плотности и температуре плавления, с использованием крошки полимера ПЭНП не дало положительного результата. Надлежащее качество сварки было получено при применении крошки из ПП и с очередностью расположения свариваемых образцов: из ПП, как более легкоплавкого, снизу, а из ПА6, как более плотного и с меньшим коэффициентом затухания колебаний — сверху (табл. 2, обозначение – «+\*»).

Одним из критериев свариваемости разнородных термопластов является их совместимость по акустическим свойствам. В связи с этим важно при сварке двух разнородных полимеров оптимизировать температурные режимы нагрева каждого из них для возможности одновременного достижения ими вязкотекучего состояния, а так же определить целесообразную очередность расположения свариваемых разнородных полимеров под волноводом.

При сварке полужестких полимеров ПП с ПА66, значительно отличающихся по плотности и температуре плавления, качественная сварка была получена с предварительным нагревом зоны сварки полимера ПА66 до 90–100 °С, что примерно соответствовало разнице их температур плавления. Расположение полимеров при сварке: ПП — снизу, ПА66 — сверху. Для увеличения концентрации напряжения на свариваемые поверхности насыпали крошку полимера ПП (табл. 2, обозначение – +\*\*).

Механизм образования сварного соединения в технологическом плане обусловлен интенсивностью звуковых колебаний, контактным давлением и временем сварки. После приложения статического давления  $P_{ст}$  к свариваемым деталям вступают в соприкосновение микронеровности их поверхностей, обусловленные предшествующей технологией изготовления, или вершины (зубцы) рифленых поверхностей деталей или, как в нашем случае, соприкосновение через мелкие частицы (крошку) полимера и подвергаются пластической деформации. Последующее включение ультразвуковых колебаний вызывает локальное выделение теплоты в зоне сварки, что приводит к расплавлению микронеровностей (частиц полимера) и растеканию расплава по всей свариваемой поверхности. Динамическое усилие  $F$ , возникающее в результате колеблющегося волновода, приводит к дробной деформации расплава свариваемого материала, сопровождаемого внедрением одного материала в другой, диффузией и перемешиванием макромолекул полимеров. Механические колебания и давление в этом случае действуют по одной линии перпендикулярно к свариваемым поверхностям.

Таким образом, установлена свариваемость некоторых разнородных полимеров (табл. 2) и не удалось сварить полиэтиленовые и полиэтилентерефталатные полимеры с полипропиленовыми и полиамидными полимерами.

По мнению авторов статьи [3], 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). 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



материалов первая стадия отсутствует. Если же полиэтиленовый материал охладить в жидком азоте, то и для нее будут характерны все три стадии сварки. Такой механизм образования сварного соединения при УЗС разнородных полимерных материалов позволяет исключить влияние различия физико-механических свойств свариваемых пластмасс. Выбор температуры охлаждения зависит от типа полимерного материала.

С учетом рекомендаций [3] становится возможным сварка мягких полимеров — полиэтиленов низкой и высокой плотности с жесткими полимерами — полиамидом ПА66 и полиэтилентерефлатом ПЭТ.

### **Выводы**

1. Оптимальные параметры режима ультразвуковой сварки полимеров зависят от физико-механических свойств, формы и размеров свариваемых деталей, рабочего цикла сварки и др. факторов и устанавливаются в каждом конкретном случае экспериментально. Определяющим параметром режима ультразвуковой сварки является амплитуда колебаний рабочего торца пуансона-волновода.

2. Установлено, что шероховатость поверхностей свариваемых деталей в зоне сварки является концентратором напряжений, способствующим интенсификации процесса тепловыделения и последующего развития и образования сварного соединения.

3. Наиболее экономичным и перспективным способом увеличения шероховатости поверхностей в зоне сварки является размещение между свариваемыми деталями мелких частиц (крошки) из одного из свариваемых материалов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Клубович, В.В. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей: монография / В. В. Клубович, В. А. Томило. — Минск: БНТУ, 2007.
2. Агрант, В. А. Ультразвуковая технология: монография / В.А. Агрант, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. — Москва, Металлургия, 1974. 503 с.
3. Волков, С.С. Влияние шероховатости свариваемых поверхностей на качество их соединения при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс / С.С. Волков, М. А. Прилуцкий — Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016, №2, С. 53–57.

### **REFERENCES**

1. Klubovich, V. V. Technology of manufacturing and processing of special periodic structures: monograph / V. V. Klubovich, V. A. Tormented. — Minsk: BNTU, 2007. (in Russian)
2. Agrant, W. A. Ultrasonic technology: monograph / V. A. Agrant, V. I. Bashkirov, J. I. Kitaygorodsky, N. N. Khavskaya. — Moscow, Metallurgiya, 1974. 503 S. (in Russian)
3. Volkov, S. S. Effect of roughness of the welded surfaces on the quality of their connection with ultrazvukovoy welding dissimilar plastics / S. S. Volkov, M. A. Prilutsky — news of higher educational institutions. Engineering, 2016, No. 2, pp. 53–57. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 03.05.17