

Исследование Влияния Параметров Процесса Ультразвуковой Сварки На Формирование Сварного Соединения Полимерных Термопластичных Материалов

Владимир Н. Хмелёв, *Senior Member*, IEEE, Алексей Н. Сливин,

Алексей Д. Абрамов, *Student Member*, IEEE

Бийский технологический институт (филиал)

ГОУ ВПО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Аннотация – В статье представлены результаты расчета и зависимости времени формирования сварного соединения от влияющих на него параметров, таких как амплитуда, частота ультразвуковых колебаний, площадь рабочего инструмента и величина вводимой ультразвуковой энергии, толщина и свойства свариваемых материалов и подложки, отражающие и пропускающие свойства границ свариваемых материалов, опоры и рабочего инструмента колебательной системы. Найденные зависимости времени формирования сварного соединения рекомендуется использовать для определения времени ультразвукового воздействия и управления процессом ультразвуковой сварки с целью получения качественного сварного соединения.

Ключевые слова – ультразвуковая сварка, полимерные материалы, параметры процесса, термопластичные материалы, формирование шва, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ сварка полимерных термопластичных материалов на производстве является важным технологическим процессом. Применение сварки для соединения различных по свойствам термопластичных полимерных материалов позволяет исключить использование растворителей и клеев, повысить прочность соединений свариваемых изделий, автоматизировать процесс соединения, применить автоматический контроль качества сварных соединений, повысить производительность всего процесса.

Основными достоинствами ультразвуковой сварки является возможность получения сварного соединения при температурах ниже температуры деструкции полимерного термопластичного материала [1]. Это позволяет исключить короб-

ление материалов и получить качественное соединение за короткий интервал времени. Локальное тепловыделение в зоне контакта свариваемых поверхностей исключает перегрев всего изделия, что позволяет формировать качественный сварной шов. Применение ультразвуковой сварки позволяет исключить образование термической деструкции поверхностей свариваемых изделий в связи с низкой температурой нагрева сварочного инструмента. Применение ультразвуковой сварки позволяет за несколько секунд получить сварное соединение любой формы, в соответствии с формой окончания сварочного инструмента ультразвуковой колебательной системы. Кроме того, обеспечивается возможность соединения трудно свариваемых материалов, в труднодоступных местах, качественный сварной шов формируется даже при наличии загрязнений на свариваемых поверхностях.

Вместе с тем известно, что качество получаемого сварного соединения зависит от выбора режима ультразвукового воздействия и используемого способа дозирования ультразвуковой энергии в зоне сварки и от способа управления процессом ультразвуковой сварки. Дозирование ультразвуковой энергии, вводимой в зону сварки определяется интервалом времени и величиной энергии ультразвуковых колебаний, акустическими свойствами свариваемых изделий или материалов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе ультразвуковой сварки, в результате поглощения ультразвуковой энергии в зоне контакта свариваемых материалов происходит размягчение и переход материалов в вязкопла-

стичное состояние, изменяется величина статического давления сжатия. В результате чего изменяется амплитуда и частота ультразвуковых колебаний сварочного инструмента ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) и его площадь контакта со свариваемыми полимерными материалами. Изменение площади контакта сварочного инструмента может привести к изменению величины выделяемой в зоне сварки ультразвуковой энергии. При этом, уменьшение выделяемой в зоне сварки энергии может привести к не полному расплавлению материалов в зоне контакта и не достаточно для качества и прочности формированию сварного соединения. Кроме этого, повышение энергии, выделяемой в зоне сварки, приведет к чрезмерному разогреву и деформации термопластичных материалов, что также окажет отрицательное влияние на качество и прочность формируемого сварного соединения.

Таким образом, в результате изменения статического давления, амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний, площади акустического контакта происходит изменение выделяемой в зоне сварки энергии, оказывающее отрицательное влияние на формирование и качество сварного соединения. Учитывая, что интервал времени ультразвукового воздействия для формирования сварного соединения полимерных материалов может занимать доли секунды, то необходимо обеспечить точное дозирование ультразвуковой энергии и стабилизацию параметров режима ультразвуковой сварки.

Известны способы дозирования ультразвуковой энергии и управления процессом сварки, направленные на стабилизацию параметров ультразвукового воздействия для получения качественного сварного соединения. Однако, существующие способы управления не позволяют производить непрерывный контроль и измерение свойств материалов в процессе сварки, не позволяют автоматически устанавливать, стабилизировать параметры ультразвукового воздействия и дозировать точное количество ультразвуковой энергии для обеспечения качества формируемого соединения при влиянии статического давления.

Известны теоретические исследования, устанавливающие взаимосвязь между энергетическими параметрами вводимых в зону сварки ультразвуковых колебаний и свойствами свариваемых материалов [1]–[4], в которых авторы производят расчет времени ультразвукового воздействия, необходимого для достижения свариваемых материалов температуры плавления. За основу было выбрано уравнение теплопроводности, производился расчет времени ультразвукового воздействия только для зоны контакта свариваемых материалов, без учета теплоотвода в опорную

подложку и рабочий сварочный инструмент УЗКС. При этом, применение установленных теоретических зависимостей для способа управления, на практике, представляет определенные трудности, так как в расчетах используются изменяющиеся с ростом температуры параметры, такие как модуль упругости и теплоемкость свариваемых материалов. Кроме этого, при расчете внутреннего источника энергии не учитывалось возможное изменение площади акустического контакта и изменение количества вводимой ультразвуковой энергии, не учитывались отражающие и пропускающие свойства границ свариваемых материалов, а также опоры и рабочего инструмента УЗКС. То есть, расчет энергии ультразвуковых колебаний был произведен для акустически прозрачных слоев материалов.

Таким образом, применение существующих способов дозирования энергии и управления, а также результатов теоретических исследований для управления не обеспечивают формирование качественного сварного соединения.

Для образования качественного и полностью сформированного сварного соединения термопластичных материалов необходимо определять точное количество ультразвуковой энергии, достаточное для перевода свариваемых материалов в расплавленное состояние, и обеспечить ввод необходимого количества энергии в свариваемые материалы в каждом случае, для формирования сварного соединения.

Для формирования качественного сварного соединения и определения точного количества энергии ультразвуковых колебаний, рассеиваемой в зоне сварки необходимо установить диапазоны регулирования энергии и времени ультразвукового воздействия в зависимости от изменения параметров, влияющих на процесс, таких как амплитуда и частота колебаний, площадь контакта сварочного инструмента УЗКС, свойства и толщина свариваемых материалов. Необходимо практически реализовать непрерывный контроль и измерение в процессе сварки изменяющихся свойств, свариваемых материалов.

III ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ВРЕМЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Процесс ультразвуковой сварки термопластичных материалов (Рис.1.) можно схематично представить в следующем виде. Свариваемые материалы 2 и 3 характеризуются акустическим импедансом $Z_1 = \rho_1 c_1$ и имеющие толщину X каждый, ограничены с одной стороны рабочим

сварочным инструментом 1 ультразвуковой колебательной системы с акустическим импедансом $Z_0 = \rho_0 c_0$, с другой стороны опорой 4, к которой осуществляется прижим свариваемых материалов посредством рабочего сварочного инструмента ультразвуковой колебательной системы под давлением P . Зоне поглощения ультразвуковых колебаний, тепловыделения и формирования сварного соединения будет соответствовать область 8 в объеме свариваемых материалов ограниченном площадью поверхности S и толщиной материалов $2X$. Ультразвуковые колебания, формируемые и усиливаемые колебательной системой вводятся в свариваемые материалы через сварочный инструмент. В результате, на границу раздела сред сварочного инструмента ультразвуковой колебательной системы и свариваемых материалов 5 вводятся ультразвуковые колебания [5].

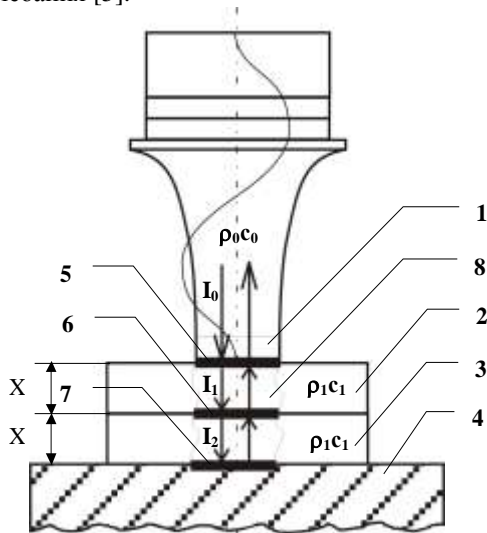


Рис.1. Схема процесса ультразвуковой сварки термопластов

На основании проведенных ранее исследований [6] можно определить суммарную энергию, поглощаемую средой 8 термопластичных материалов, в процессе ультразвуковой сварки.

$$W = I_1(1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 e^{-4\alpha x} - \eta_2 I_1 e^{-8\alpha x})S \quad (1)$$

Подставив интенсивность ультразвуковых колебаний в средах с учетом различных акустических импедансов, коэффициентов отражения, после чего получим скорость диссипации энергии ультразвуковых колебаний или мгновенную скорость тепловыделения в свариваемых материалах

$$W = 2\pi^2 f^2 A_0^2 S \rho_0 c_0 (1 - \eta_1) \times (1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 e^{-4\alpha x} - \eta_2 e^{-8\alpha x}) \quad (2)$$

Полученное выражение позволяет установить зависимость времени ультразвуковой сварки от энергии ультразвуковых колебаний, рассеиваемой

в зоне сварки и значения энергий, необходимых для нагрева материала до температуры плавления и энергии, которая потребуется на плавление определенного объема материала [4].

$$t = \frac{\rho_1 \Delta T V_1 \int_{T_n}^{T_{nn}} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3}{2\pi^2 f^2 A_0^2 S \rho_0 c_0 (1 - \eta_1) (1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 e^{-4\alpha x} - \eta_2 e^{-8\alpha x})} \quad (3)$$

Из выражения (3) можно получить основные закономерности, показывающие зависимость времени сварки от других параметров (амплитуда и частота ультразвуковых колебаний, геометрические размеры, такие как площадь и толщина формируемого сварного соединения, акустические свойства материалов, плотность, скорость звука, с учетом отражения и поглощения ультразвуковой энергии и т.д.). Числитель выражения (3) характеризует сумму энергий, необходимых для нагрева материала до температуры плавления и энергии, которая потребуется на плавление определенного объема материала. Значение величины Q_3 характеризует некоторые потери тепла из зоны сварки.

Используя выражение (3) можно определить основные зависимости времени формирования сварного соединения от влияющих факторов. На Рис.2. представлена теоретическая зависимость времени формирования сварного соединения от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента для различных по свойствам полимерных термопластичных материалов. На Рис.3. представлена зависимость времени формирования сварного соединения от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента для поливинилхлорида при использовании различных материалов подложки.

Полученные зависимости были определены для поливинилхлорида, полипропилена, полиэтилена, полиэтилентерефталата, полистирола с учетом их акустических свойств. Все расчеты были произведены для листовых материалов толщиной 0.8 мм, и площади сварочного инструмента ультразвуковой колебательной системы 75 мм². На Рис. 2. и Рис.3. представлены также оптимальные значения времени формирования сварного соединения для материалов при амплитуде колебаний 50 мкм. При этом, минимальное значение времени формирования для полиэтилена составляет 0.2 с, а максимальное 1.586 с для полиэтилентерефталата. Это объясняется, прежде всего, большей температурой плавления последнего, и необходимостью введения большего количества ультразвуковой энергии для достижения температуры плавления.

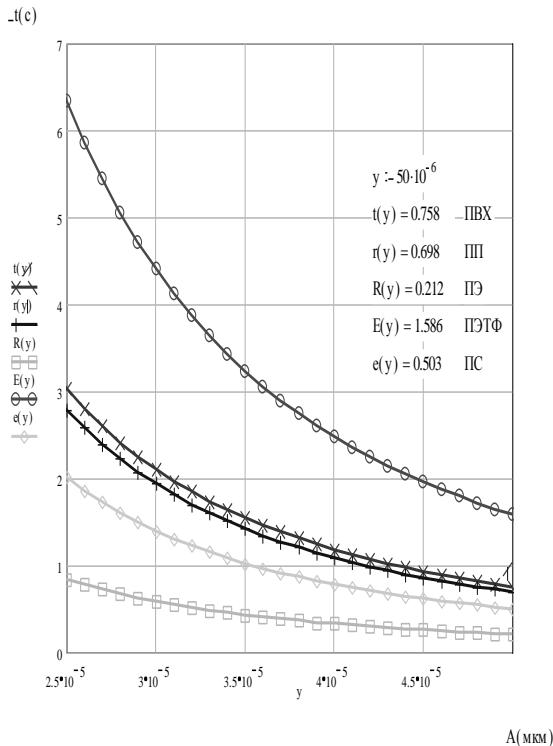


Рис. 2. Зависимость времени формирования сварного соединения для различных термопластичных материалов от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента

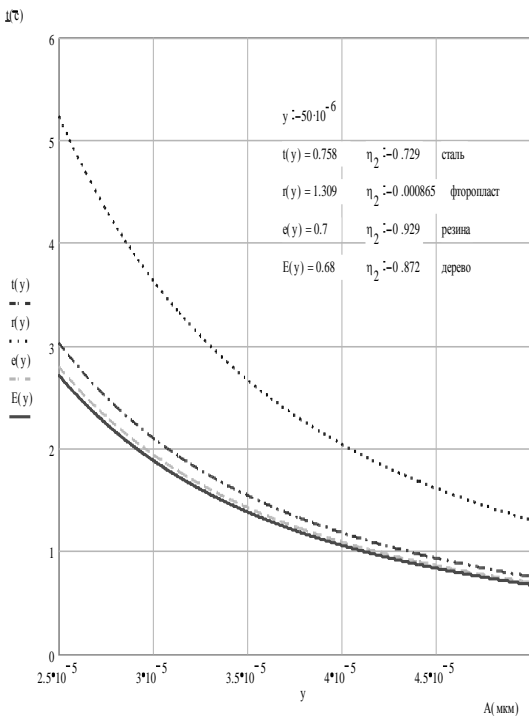


Рис.3. Зависимость времени формирования сварного соединения от амплитуды колебаний рабочего сварочного инструмента для ПВХ при использовании различных материалов подложки

Из построенного графика видно, что при увеличении амплитуды время необходимое для

формирования сварного соединения уменьшается. Это объясняется тем, что при увеличении амплитуды колебаний значительно возрастает скорость диссипации энергии в материале. На графике Рис.4. представлены зависимости времени сварки от площади акустического контакта сварочного инструмента и свариваемых материалов, для различных по свойствам материалов.

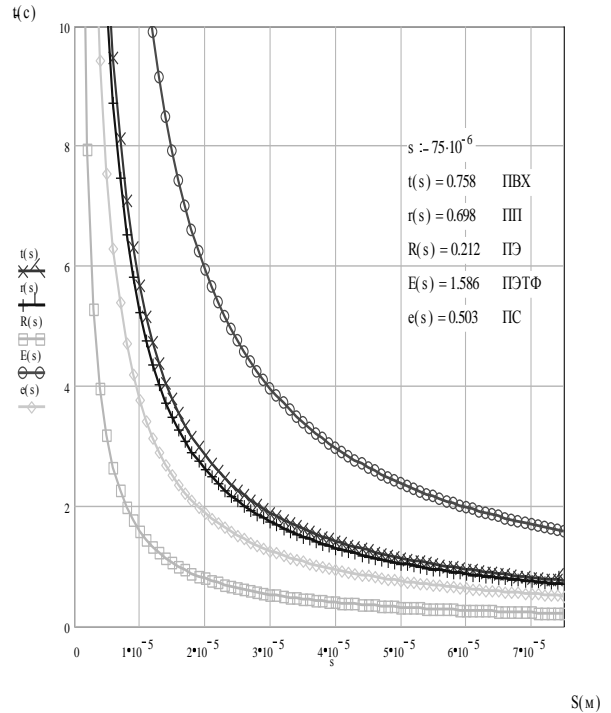


Рис. 4 – Зависимость времени формирования сварного соединения от изменения площади акустического контакта

Также представлены значения оптимального времени ультразвукового воздействия при обеспечении полного акустического контакта и максимальной площади контакта сварочного инструмента ультразвуковой колебательной системы и материалов равной $75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. При этом, при уменьшении площади акустического контакта, в свариваемые материалы вводится меньшее количество ультразвуковой энергии, значение величины оптимального времени ультразвукового воздействия для формирования соединения увеличивается.

Величина вводимой ультразвуковой энергии в свариваемые материалы и выделяемой в зоне формирования сварного соединения зависит от толщины свариваемых материалов. Известно, что с увеличением толщины материалов амплитуда ультразвуковых колебаний и интенсивность энергии уменьшается тем сильнее, чем больше толщина свариваемых материалов. На Рис. 5. представлены зависимости времени сварки от толщины различных по свойствам свариваемых материалов.

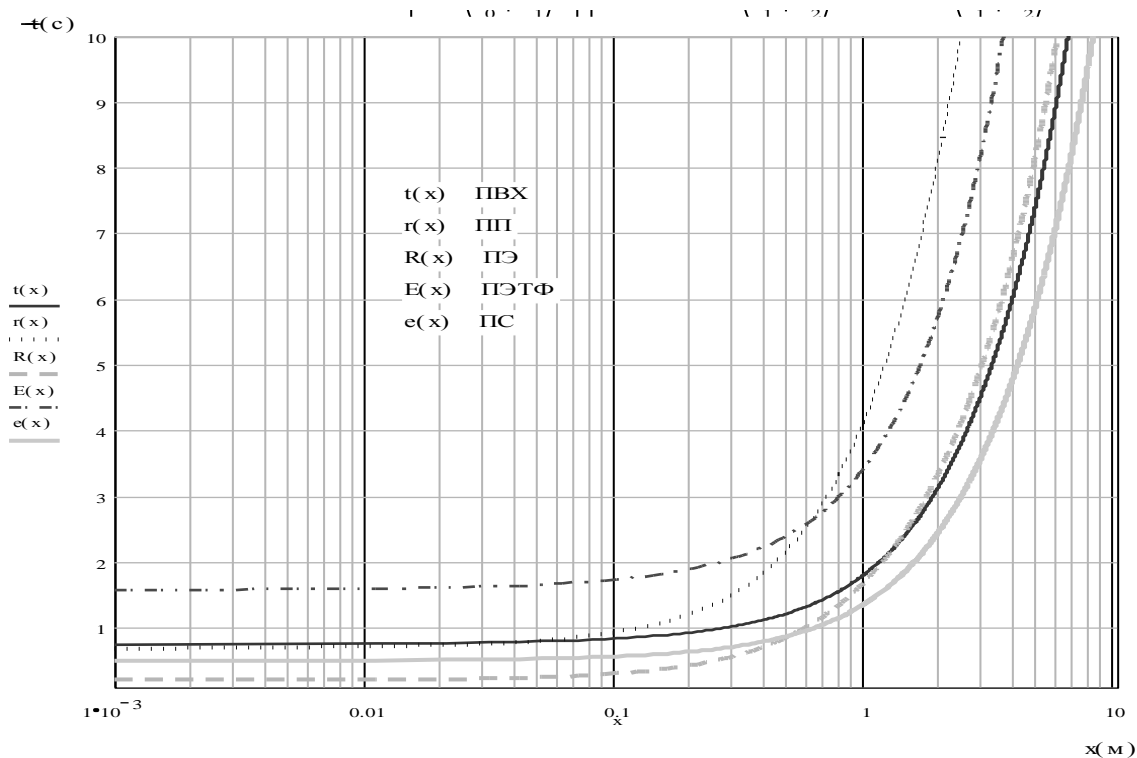


Рис. 5. Зависимость времени формирования соединения от толщины различных свариваемых материалов

Таким образом, все перечисленные выше параметры, амплитуда, площадь акустического контакта, свойства и толщина свариваемых материалов влияют на затухание колебаний и изменение значения энергии ультразвуковых колебаний, выделяющейся в зоне сварки, что, в свою очередь, влияет на выбор оптимального времени ультразвукового воздействия. Кроме этого, проведенные теоретические исследования показали, что большое влияние на время формирования сварного соединения оказывает величина ультразвуковой энергии, вернувшейся в свариваемые материалы, в результате отражения от среды подложки или опоры, к которой осуществляется прижим материалов.

Полученные закономерности основных влияющих параметров послужили основой цикла исследований [7]–[10], целью которых явился поиск зависимости между изменяющимися свойствами полимерных материалов в процессе формирования шва и амплитудой механических колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрической колебательной системы.

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволили установить, что для обеспечения максимального тепловыделения в зоне сварки необходимо использование опоры из таких материалов, обеспечивающих максимальный коэффициент отражения. Теоретические расчеты показали, что целесообразно применение специальной опоры из резины.

В Табл. I приведены результаты расчета количества энергии, необходимого для формирования сварного соединения некоторых полимерных термопластичных материалов, скорости диссипации энергии ультразвуковых колебаний в свариваемых материалах и времени ультразвукового воздействия, с учетом отражающих и пропускающих свойств, границ свариваемых материалов, опоры и рабочего инструмента УЗКС со свариваемыми материалами.

При проведении экспериментальных исследований было установлено, что для образования сварного соединения необходимо обеспечить чуть большее время ультразвукового воздействия, чем при теоретическом расчете. Полученное время сварки получилось меньше экспериментальных значений, так как в расчетах не учитывается рассеяние энергии Q_3 из объема зоны сварки в свариваемые материалы, в опору и в сварочный наконечник. Не учитывается изменение площади контакта сварочного наконечника УЗКС со свариваемыми материалами, а также площадь контакта между свариваемыми материалами, что оказывает влияние на количество энергии вводимой в свариваемые материалы. Так как, известно, что на практике начальная площадь контакта значительно меньше, а в процессе сварки, при введении ультразвуковых колебаний происходит размягчение свариваемых материалов и площадь контакта увеличивается.

Кроме этого, необходимо учитывать экстремальный характер изменения теплоёмкости от температуры при повышении температуры в зоне сварки до температуры плавления, связанной с изменением свойств, свариваемых материалов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Полученные теоретические закономерности позволили провести экспериментальные исследования, которые заключались в ультразвуковом воздействии на различные по свойствам материалы, такие как поливинилхлорид, полипропилен, полиэтилентерефталат, получения сварных соединений и получении зависимостей электрических параметров колебательных систем в процессе ультразвуковой сварки. Что позволило определить время формирования сварного соединения экспериментально в результате измерения тока, напряжения и нагрузки на УЗКС.

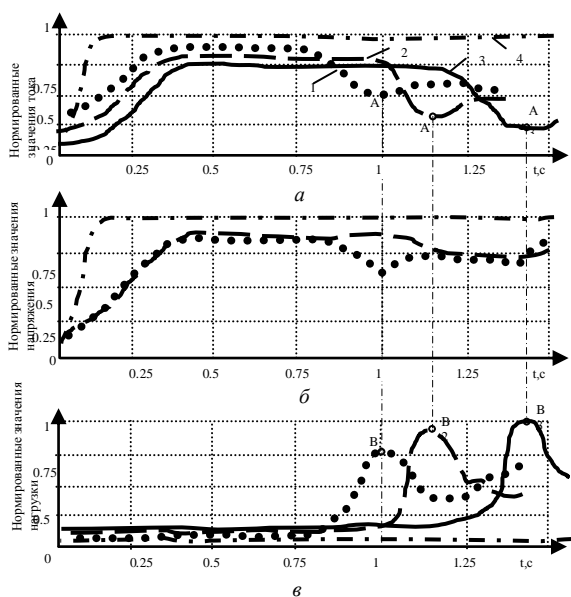


Рис. 6. Экспериментальные результаты определения времени формирования сварного соединения ПВХ, при влиянии сварочного давления

В результате проведенных экспериментальных исследований определено влияние статического сварочного давления (Рис. 6.) и амплитуды колебаний (Рис. 7.) на время формирования сварного соединения.

Из представленных зависимостей на Рис. 6 видно, что при сварке материала значения тока и напряжения меньше по уровню, чем при холодном режиме (зависимость 4). На Рис. 6, в представлены зависимости сопротивления нагрузки при ультразвуковой сварке ПВХ при различном сварочном давлении $P_{св}$: 7 МПа, 9 МПа и 10 МПа – кривые 1–3 соответственно.

Зависимости, представленные на Рис. 7, были получены при амплитуде колебаний рабочего торца волновода 60 мкм, 50 мкм и 40 мкм.

Из зависимостей следует, что время сварки существенно зависит от амплитуды колебаний рабочего торца волновода.

Продолжительность сварки уменьшается с увеличением амплитуды колебаний. Такой характер изменения времени сварки связан с тем, что увеличение амплитуды колебаний приводит к увеличению вводимой в свариваемый материал механической энергии.

На Рис. 8. представлены экспериментальные зависимости времени формирования сварного соединения от свойств свариваемых материалов полученных на образцах из ПП (кривая 1), ПВХ (кривая 2) и ПЭТФ (кривая 3) в процессе

УЗ сварки при сварочном давлении 10 МПа и амплитуде колебаний 50 мкм.

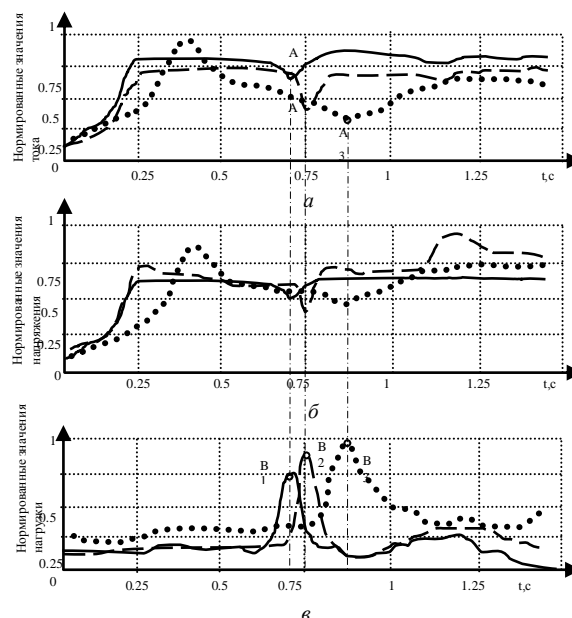


Рис. 7. Экспериментальные результаты времени формирования сварного соединения ПВХ, при влиянии амплитуды колебаний – кривые 1-3 соответственно.

Из рисунка видно, что момент перехода в вязкопластичное состояние у материалов различно. Это объясняется различием свойств полимерных материалов.

При этом, сравнивая влияние свойств свариваемых материалов на количество выделяемой в зоне сварки ультразвуковой энергии, влияющей на момент формирования сварного соединения можно сделать вывод, что влияние оказывают удельная теплоемкость, теплота плавления материала, акустический импеданс, коэффициент затухания по амплитуде. То есть те параметры

свойств материалов, определяющие величину энергии, выделяющейся в зоне сварки.

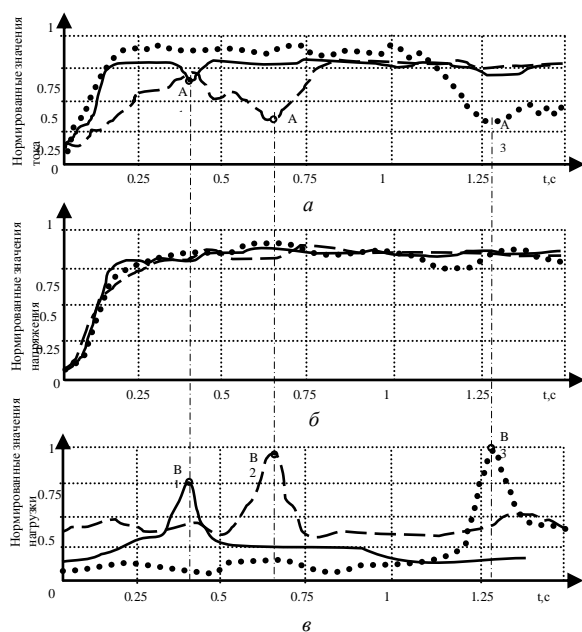


Рис. 8. Экспериментальные данные определения времени формирования сварного соединения в зависимости от свойств свариваемых материалов ПП (1), ПВХ (2) и ПЭТФ (3)

Для подтверждения эффективности полученного критерия оптимального ввода ультразвуковой энергии в свариваемые материалы был произведен сравнительный анализ значений времени формирования сварного соединения, полученных при теоретическом расчете и при проведении экспериментов (Табл. 1).

ТАБЛИЦА I
РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВРЕМЕНИ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наименование материала	время сварки, сек		Отклонение, %
	Теоретический расчет	Эксперимент (среднее)	
Поливинилхлорид	0,758	0,6	21
Полипропилен	0,698	0,6	14
Полиэтилен	0,212	0,25	15
Полиэтилентерефталат	1,568	1,8	13
Полистирол	0,503	0,6	17

В результате проведенных экспериментальных исследований, было произведено по пять измерений для различных по свойствам материалов. В таблице представлены средние значения времени формирования сварного соединения, Полученное экспериментально, время сварки отличается от теоретических расчетных

значений в среднем на 16%. Возможно это связано с тем, что в расчетах не учитывалось рассеяние энергии Q_3 из объема зоны сварки в свариваемые материалы, в опору и в сварочный инструмент УЗКС.

На основании полученного критерия оптимальности, и изменении значения величины тока, протекающего через механическую ветвь колебательной системы, при формировании сварного шва производилось определение момента формирования сварного соединения и отключение ультразвукового воздействия. Новый критерий позволил предложить и практически реализовать новые способы управления [8], [11]–[14] процессами ультразвуковой сварки полимерных материалов, защищенные патентами РФ. Для подтверждения эффективности предложенного способа управления были проведены исследования прочности формируемых сварных соединений полимерных термопластичных материалов, которые проводились по методу испытаний на растяжение образцов из полипропилена и поливинилхлорида по ГОСТ 11262-80. При этом изготовление образцов и получение швов сварных соединений полимерных термопластичных материалов производилось по ГОСТ 16971-71. По результатам испытаний установлено, что коэффициент сохранения свойств сваренных образцов из полипропилена составляет 76%, для образцов из поливинилхлорида составляет 81%, что составляет не менее 75% от прочности основного материала, что удовлетворяет прочности сварного соединения по стандарту качества сварных соединений полимеров ГОСТ 11262–80.

V ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для формирования качественного сварного соединения различных по свойствам термопластичных материалов был произведен расчет и установлены диапазоны регулирования энергии и времени ультразвукового воздействия в зависимости от изменения параметров, влияющих на процесс, таких как амплитуда и частота колебаний, площадь контакта сварочного инструмента УЗКС, свойства и толщина свариваемых материалов, свойства материалов подложки.

Для стандартного ультразвукового оборудования с площадью сварочного инструмента равной $75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, обеспечивающим амплитуду колебаний 40...60 мкм практически реализован непрерывный контроль процесса сварки в зависимости от изменения параметров, влияющих на процесс, таких как сварочное давление и площадь контакта сварочного инструмента УЗКС,

амплитуда колебаний, свойства свариваемых материалов.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что максимальное тепловыделение в зоне сварки обеспечивается при выборе определенных материалов опоры, значительно отличающихся по акустическому импедансу от акустического импеданса свариваемых материалов.

Найденный критерий определения энергии в зоне сварки и времени ультразвукового воздействия используется для управления процессом ультразвуковой сварки и для формирования качественного сварного соединения термопластичных материалов. Для подтверждения эффективности предложенного способа управления были проведены исследования прочности формируемых сварных соединений полимерных термопластичных материалов, которые проводились по методу испытаний на растяжение образцов из полипропилена и поливинилхлорида по ГОСТ 11262-80.

По результатам испытаний установлено, что коэффициент сохранения свойств сваренных образцов составляет не менее 75 % от прочности основного материала, что удовлетворяет прочности сварного соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1986. – 256 с.
- [2] Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. Сварка пластмасс. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
- [3] Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 224 с.: ил.
- [4] Волков С.С., Орлов Ю.Н., Астахова Р.Н. Сварка и склеивание пластмасс. М., «Машиностроение», 1972, 128 с.
- [5] Мозговой И.В. Основы технологии ультразвуковой сварки полимеров И.В. Мозговой//Учеб. Пособие, Изд-во Красноярского ун-та, 1991, 280 с.
- [6] Slivin A.N. Model of Process and Calculation of Energy for a Heat Generation of a Welded Joint at Ultrasonic Welding Polymeric Thermoplastic Materials / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.316-322.
- [7] Slivin, A.N. Measurement Parameters of Ultrasonic Oscillatory System during Welding Thermoplastics / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov, D.S. Abramenko// International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.323-327.
- [8] Способ управления процессом ультразвуковой липосакции: Пат. 2247544 Российская Федерация, МПК⁷ А 61 В 18/00. / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2003117268/14; заявл. 09.06.03; опубл. 10.03.05, Бюл. №7. – 8с.: ил.
- [9] Сливин, А.Н. Способ контроля качества ультразвуковой сварки полимерных материалов / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, И.И. Савин, А.В. Шалунов, Т.А. Демидова // Межвузовский сборник «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях». – Бийск: АлтГТУ, 2002. – С.184-190.
- [10] Сливин, А.Н. Определение критерия качества герметизирующего шва при ультразвуковой сварке контейнеров с препаратами крови ручным запаивателем/ В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, И.И. Савин, А.В. Шалунов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под ред. Г.В. Леонова. – Бийск, 2004. – С. 200–204.
- [11] Способ герметизации пластиковых контейнеров для хранения и переработки крови: пат. №2171669 Российская Федерация: МПК⁷ А61J1/05 / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №99114203/14; заявл. 29.06.99; опубл. 10.08.01, Бюл. № 22. – 4 с.: ил.
- [12] Способ управления процессом ультразвуковой герметизации пластиковых контейнеров для хранения и переработки крови: Пат. 2192375 Российская Федерация, МПК 7 А 61 J 1/05. / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2000104737/13; заявл. 28.02.00; опубл. 27.03.02, Бюл. № 4 – 9с.: ил.
- [13] Способ герметизации пластиковых контейнеров для хранения и переработки компонентов крови: пат. №2269334 Российская Федерация: МПК⁷ А61J1/05, В65В51/22 / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2004115358/14; заявл. 20.05.04; опубл. 10.02.06, Бюл. № 4. – 3 с.: ил.
- [14] Способ герметизации пластиковых пакетов при упаковке сыпучих и жидких продуктов / Пат. 2276014 Российская Федерация, МПК⁵ В29С 65/08 В65В 51/22 В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, М.В. Хмелев, А.Н. Лебедев, С.В. Левин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2004135854/12; заявл. 07.12.04; опубл. 10.05.06, 9 с.: ил.