

Статистические зависимости влияния времени воздействия ультразвука на прочность и другие параметры сварного соединения полипропилена

© 2023

*Мурашкин Сергей Викторович*¹, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
Селиванов Александр Сергеевич^{*2}, кандидат технических наук,
директор института машиностроения
*Спиридонов Николай Германович*³, аспирант,
ассистент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
*Савина Елена Борисовна*⁴, магистр

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*E-mail: selivas@inbox.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9613-7313>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5267-0629>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2283-0104>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-6431>

Поступила в редакцию 30.06.2022

Принята к публикации 21.03.2023

Аннотация: Полипропилен является одним из наиболее востребованных термопластичных материалов, применяемых в промышленности. Для изготовления изделий из данного материала зачастую применяется способ ультразвуковой сварки. Однако, несмотря на большое количество научных работ, влияние некоторых параметров режима ультразвуковой сварки на прочностные характеристики соединений полипропилена остается неизученным. В работе представлены результаты экспериментальных исследований контактной точечной ультразвуковой сварки пластин толщиной 3 мм из полипропилена марки 01003-26. Рассмотрен процесс постепенного внедрения рабочего торца ультразвукового инструмента в полипропилен до глубины, равной общей толщине свариваемых пластин. Получены статистические зависимости глубины внедрения торца инструмента в материал и усилия отрыва материала от времени воздействия ультразвука. Определено влияние глубины внедрения рабочего торца ультразвукового инструмента на усилие отрыва сваренных образцов. Обнаружено значительное увеличение усилия отрыва с 150 до 400 Н при глубине внедрения инструмента свыше 3,5 мм, обусловленное ростом номинальной площади взаимного перемешивания материала между свариваемыми пластинами, вызванного затеканием расплавленного материала в зазор. Предложена гипотеза о течении расплавленного материала в сторону, противоположную направлению внедрения рабочего инструмента, путем формирования бегущих волн Релея. Однако ее подтверждение требует проведения дополнительных исследований влияния параметров режима ультразвуковой сварки и величины зазора между соединяемыми деталями на скорость затекания расплавленного материала в зазор.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка пластмасс; полипропилен; прочность сварного соединения; рабочая часть сварочного инструмента; время ультразвуковой сварки; глубина внедрения торца ультразвукового инструмента.

Для цитирования: Мурашкин С.В., Селиванов А.С., Спиридонов Н.Г., Савина Е.Б. Статистические зависимости влияния времени воздействия ультразвука на прочность и другие параметры сварного соединения полипропилена // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 1. С. 57–67. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-1-57-67.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня различные полимерные материалы за счет ряда своих технико-экономических показателей все активнее начинают вытеснять металлы. Прежде всего, речь идет о значительной коррозионной стойкости, высоких механических свойствах при относительно малой плотности и более низкой, чем у металлов и сплавов, стоимости [1; 2]. По масштабам производства среди термопластичных полимерных материалов, которые характеризуются способностью переходить при нагреве в вязкотекучее и затем жидкотекучее состояние, ведущее место занимают полиолефины. В эту группу входят полиэтилен низкой и высокой плотности, полипропилен и др. По темпам роста объема производства эти материалы превосходят все другие полимерные материалы, и в настоящее время в мировом производстве полиэтилен занимает первое место, а полипропилен –

четвертое [3]. Массовое использование полиолефинов для изготовления различных изделий предполагает совершенствование технологических процессов их соединения. Ультразвуковая сварка полимерных материалов остается одним из наиболее востребованных способов соединения деталей при сборке изделий и строительных конструкций [4; 5].

Однако из-за сложности ультразвукового оборудования и незнания влияния различных параметров режима сварки и дополнительных факторов (времени сварки, сварочного усилия, материала подложки, времени выдержки, формы энергетического концентратора и т. д.) на прочностные характеристики получаемого соединения производители пластиковых изделий из полипропилена и полиэтилена сталкиваются с проблемами определения оптимальных режимов ультразвуковой сварки, которые бы обеспечили требуемые показатели прочности готовой продукции.

На поиск оптимальных режимов ультразвуковой сварки полипропилена направлены исследования, представленные в [6]. Авторы подчеркивают влияние переменных параметров сварки, а именно времени сварки, времени выдержки и амплитуды колебаний, на прочностные характеристики образцов полипропилена марки Н110МА. По результатам экспериментов определены оптимальные значения технологических переменных, позволяющие обеспечить максимальную прочность на отрыв: время сварки – 1200 мс, время выдержки – 900 мс, амплитуда колебаний – 75 %.

В [7] были найдены оптимальные режимы для ультразвуковой сварки полипропилена, наполненного 10 % стекловолокна. Результаты экспериментов показали, что максимальное разрушающее усилие около 2,3 кН достигается при сварочном усилии в 1,5 бар, амплитуде колебаний 32 микрона и времени сварки 0,4 с.

Авторы работы [8] исследуют влияние амплитуды и времени сварки на прочностные характеристики полипропилена, утверждая, что они являются наиболее важными параметрами прочности сварного шва. Ультразвуковая сварка образцов происходила с применением пирамидального энергетического концентратора, что позволило обеспечить прочность сварного шва на сдвиг, равный 22,36 МПа (319 % исходной прочности).

Авторы [9] утверждают, что именно форма энергетического концентратора в наибольшей степени влияет на прочность соединения, а пирамидальный энергетический концентратор позволяет получать наиболее прочные соединения из чистого полипропилена.

В работе [10] авторы заявляют, что основными факторами, влияющими на прочность сварного соединения из полипропилена, являются время сварки и сварочное усилие. По результатам экспериментов было установлено, что время сварки меньше 2 с и сварочное усилие меньше 2 Н не обеспечивают получение монолитного соединения, а время сварки 8 с и сварочное усилие в 8 Н приводит к образованию в сварном шве пор и дефектов. Оптимальными режимами для ультразвуковой сварки образцов из полипропилена толщиной 4 мм являются: время сварки – 4–6 с, сварочное усилие – 5–7 Н.

Авторы [11] считают, что уровень ухудшения механических и термических свойств изделий из полипропилена после ультразвуковой сварки зависит от изменения кристаллической структуры, температуры стеклования и потери массы, так как во время плавления полипропилен претерпевает кристаллические переориентации. В результате образуется фаза, имеющая промежуточный кристаллический порядок и отличающаяся от нормальной фазы. После сварки полипропилена значения температуры стеклования имеют тенденцию к изменению от 5 до 10 К/мин.

Исследования, позволяющие более подробно понять степень воздействия ультразвуковых колебаний на структуру полипропилена, представлены в работе [12]. Авторами установлено, что после ультразвуковой сварки прочность сварных соединений после 300–600 ч старения достигает 90–100 % от прочности основного материала. Однако наблюдается существенная нестабильность прочности, что прослеживается даже на одном изделии, когда прочность различных участков шва колеблется в пределах от 50 до 100 % прочности основного материала. Это объясняется сложными волновыми

процессами при распространении ультразвука в свариваемых пластмассовых деталях, что приводит к неравномерному изменению структуры материала шва [13].

Более подробный анализ воздействия ультразвуковых колебаний на формирование сварного соединения из полипропилена современными методиками, такими как дифференциальная сканирующая калориметрия, термогравиметрический анализ, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье и сканирующая электронная микроскопия, был проведен в [14]. Анализ степени растяжения образцов после ультразвуковой сварки позволил сделать вывод, что увеличение основных параметров процесса (давления, времени и амплитуды колебаний) приводит к повышению прочности шва, однако было отмечено снижение пластичности. Путем сканирующей электронной микроскопии было выявлено образование пустот, тесно коррелирующее с амплитудой колебаний.

В работах [15–17] приведены доказательства, что прочность сварного соединения при ультразвуковой сварке напрямую зависит от количества расплава, находящегося между контактными поверхностями. При этом количество расплава определяется целым комплексом режимов ультразвуковой сварки и зависит от амплитуды и частоты колебаний, сварочного усилия, глубины внедрения торца волновода в материал, времени воздействия ультразвука и других параметров [18].

Исходя из анализа научных публикаций, можно сделать вывод, что в литературе хорошо изучено влияние времени сварки, амплитуды колебаний, сварочного усилия, геометрии энергетического концентратора на прочностные характеристики образцов из полипропилена и структуру получаемого шва. Все эти факторы напрямую определяют количество расплава, образующегося между деталями в процессе сварки. Однако на количество расплава в зазоре оказывает влияние и глубина внедрения торца рабочего инструмента, которая напрямую зависит от времени воздействия ультразвука. Данный вопрос не освещен в научной литературе.

Цель исследования – повышение прочности сварных соединений полипропилена, полученных в процессе ультразвуковой сварки, путем регулировки времени воздействия ультразвука на зону сварки и глубины внедрения торца сварочного волновода в полипропилен.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ультразвуковую сварку образцов проводили с помощью технологического комплекса ультразвуковой сварки пластмасс, состоящего из устройства для сварки и ультразвукового генератора УЗГ-2М. Устройство для ультразвуковой сварки состоит из ультразвуковой колебательной системы (УЗКС), размещенной внутри металлической гильзы. УЗКС содержит магнитострикционный преобразователь электрической энергии в энергию механических продольных колебаний и ультразвуковой волновод, жестко связанный с торцом преобразователя. Рабочая часть ультразвукового волновода имеет вид цилиндрического стержня с плоским торцом диаметром 5 мм.

Технологический комплекс ультразвуковой сварки устанавливали на универсально-фрезерном станке FHV-50PD с помощью специально разработанной оснастки. Оснастка включает в себя:

– приспособление для ориентирования и фиксации образцов-пластин во время УЗС, выполненное в виде призмы с квадратным основанием, на верхнем торце которой расположены два взаимно перпендикулярных паза-ложемента для образцов-пластин;

– приспособление для крепления устройства УЗС на пиноль станка представляет собой кронштейн, имеющий два клеммовых зажима для зажима пиноли и устройства УЗС соответственно;

– приспособление для создания постоянного статического давления рабочего торца ультразвукового волновода на зону сварки включает в себя калиброванный груз, подвешенный к штурвалу рычажно-реечного механизма шпиндельной головки станка;

– приспособление для измерения силы прижима рабочего торца ультразвукового волновода к контактной поверхности образцов-пластин состоит из пружины 7039-2023 по ГОСТ 13165-1967 и прямоугольной призмы с глухим цилиндрическим отверстием, расположенным в центре одной из ее граней.

Пружину при калибровке устанавливали в отверстие призмы до упора. Результатом калибровки является уравнение прямой вида

$$\Delta(F) = b \cdot F, \quad (1)$$

где $\Delta(F)$ – зависимость деформации от силы сжатия пружины;

b – коэффициент пропорциональности, $b=0,122$ мм/Н;

F – сила сжатия пружины, Н.

В качестве образцов использовали пластины прямоугольной формы, вырезанные из листового полипропилена 01003-26 толщиной 3 мм по ГОСТ 26996-1986 (рис. 1).

Контактную точечную ультразвуковую сварку образцов внахлест осуществляли по схеме, представленной на рис. 2.

Цикл сварки состоял из последовательного выполнения следующих действий:

– приложение постоянного статического давления $P_{ст}$, равного $1,32 \pm 0,10$ МПа, что соответствует силе F сжатия пружины, равной 26 ± 2 Н;

– выдержка в течение 3 с для предварительного сжатия образцов-пластин под давлением $P_{ст}$;

– включение УЗК (не снимая давления);

– выключение УЗК через время $t_{н}=1,2 \dots 3,6$ с;

– выдержка образца сварного соединения под давлением $P_{ст}$ в течение 3 с;

– снятие статического давления $P_{ст}$.

Статическое давление $P_{ст}$ прикладывается до включения УЗК (время предварительного сжатия $t_{п}$ равно 3 с), считается постоянным в течение всего сварочного цикла и снимается с запаздыванием на t_3 . Время запаздывания равно 3 с. Время воздействия ультразвука $t_{н}$ варьируется в пределах от 1,2 до 3,6 с.

Перед первым циклом и через каждые 15 циклов УЗС измеряли деформацию сжатия пружины и при помощи уравнения (1) вычисляли величину силы прижима, которую контролировали в заданных пределах 26 ± 2 Н.

Образцы-пластины, имеющие с двух сторон глянцевые (с низкой шероховатостью) плоские поверхности (рис. 1) устанавливали в соответствующие ложементы (рис. 3), равномерно закрепляли и прижимали друг к другу при помощи винтов.

Режим УЗС: выходная мощность генератора 330 ± 10 Вт, амплитуда и частота колебаний 67 ± 3 мкм и 21915 ± 5 Гц соответственно, сила прижатия рабочего торца сварочного инструмента (СИ) к образцам прикладывалась в направлении, перпендикулярном плоскости их разреза, и поддерживалась в пределах 26 ± 2 Н при помощи калиброванного груза, подвешенного к штурвалу рычажно-реечного механизма шпиндельной головки станка. После каждого выполненного цикла контролировали

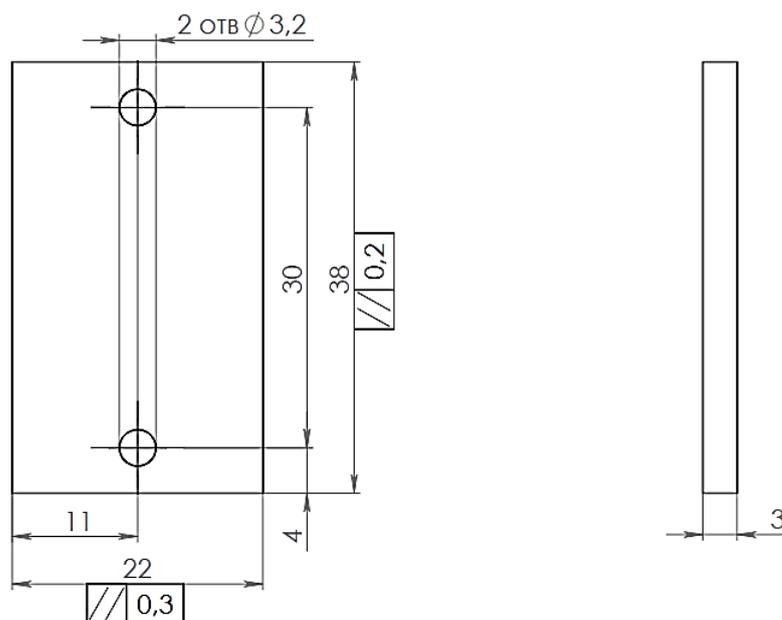


Рис. 1. Образец-пластина

Fig. 1. A sample plate

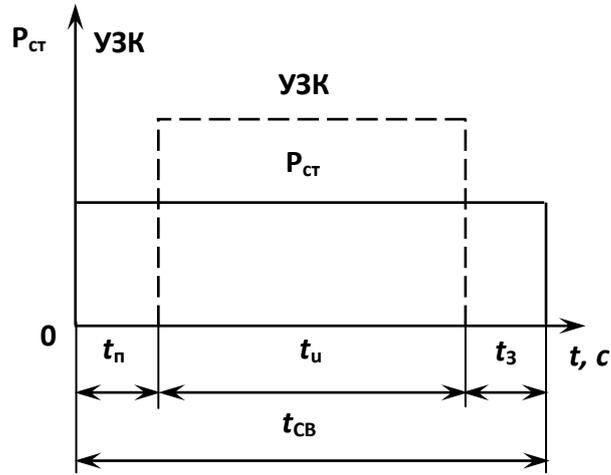


Рис. 2. Рабочий цикл УЗС «статическое давление – ультразвук»:

$P_{ст}$ – статическое давление; УЗК – ультразвуковые колебания; $t_{п}$ – время предварительного сжатия образцов; $t_{и}$ – время воздействия УЗК; $t_{з}$ – время задержки снятия статического давления; $t_{св}$ – время сварки

Fig. 2. “Static pressure – ultrasound” USW working cycle:

$P_{ст}$ – static pressure; УЗК – the ultrasonic vibrations; $t_{п}$ – the time of preliminary pressing of samples; $t_{и}$ – the ultrasonic vibration exposure time; $t_{з}$ – the static pressure-off delay time; $t_{св}$ – the welding time

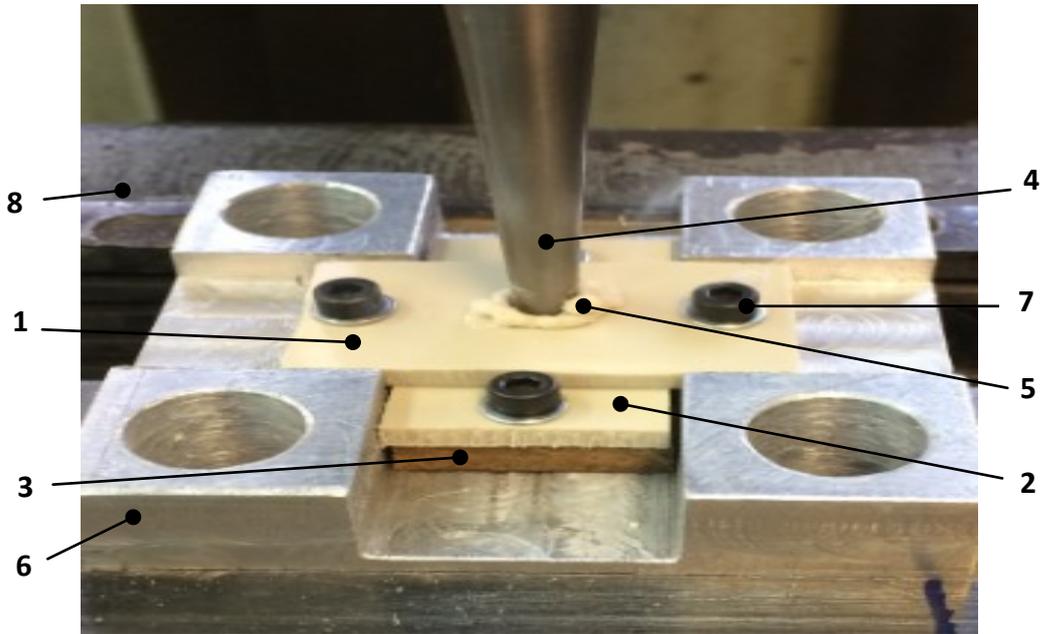


Рис. 3. Создание образца сварного соединения полипропилена на фрезерном станке:

1 и 2 – верхний и нижний образцы-пластины соответственно; 3 – термоизоляционная подкладка; 4 – сварочный инструмент; 5 – наплыв выдавленного расплава;

6 – призма ложементов; 7 – винты и шайбы для крепления образцов; 8 – тиски станочные

Fig. 3. The creation of a sample of a polypropylene welded joint on a milling machine:

1 and 2 – the upper and lower plates-samples respectively; 3 – the heat insulating substrate;

4 – the welding tool; 5 – the overlap of a pressed-out melt; 6 – the lodgments’ prism; 7 – screws and washers for sample fixation; 8 – the machine-tool clamps

температуру поверхности СИ, погружая его на 2 мин в емкость с холодной водой, затем обдували сжатым воздухом при температуре 22 ± 2 °С и протирали салфеткой. Время воздействия ультразвука на зону сварки устанавливали по таймеру генератора в диапазоне 1,2...3,6 с с шагом, равным 0,2 с. При каждом значении времени выполняли пять экспериментов (создавали пять образцов сварного соединения). Образцы соединений по мере их создания (рис. 3) маркировали арабскими цифрами и подготавливали к измерению глубины внедрения рабочего торца волновода в полипропилен.

Измерение глубины внедрения ультразвукового волновода в материал выполняли при помощи стойки, оснащенной измерительными головками типа С-IV ГОСТ 10197-1970 согласно схеме (рис. 4). Толщину H сварного соединения измеряли толщиномером ABSOLUTE Digimatic 547-401, имеющим диапазон измерений от 0 до 12 мм, разрешение 1 мкм и погрешность ± 3 мкм.

Величину глубины внедрения волновода в материал определяли по формуле (рис. 4)

$$h = H - c,$$

где h – глубина внедрения рабочего торца СИ в полипропилен, мм;

H – общая толщина пластин, входящих в сварное соединение, мм;

c – толщина «дна», мм.

Испытание сваренных образцов на разрыв проводили в соответствии с ГОСТ Р 55142-2012 после их выдержки в течение 24 ч для завершения процесса полимеризации материала. Испытания выполняли на разрывной испытательной машине модели 5966 фирмы Instron (США), оснащенной датчиком силы с пределом измерения 10 кН и допускаемой погрешностью измерений $\pm 0,5$ %. При этом придерживались следующей последовательности:

– испытуемые образцы кондиционировали не менее 4 ч по ГОСТ 12423-2013 при температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 5) %;

– образец сварного соединения крепили в приспособлении (рис. 5) и устанавливали в испытательную машину так, чтобы верхняя и нижняя зажимные пластины были прижаты губками соответствующих зажимов машины;

– образец нагружали растягивающим усилием в направлении, перпендикулярном плоскости разъема пластин сварного соединения, со скоростью 1 мм/мин до полного отрыва пластин друг от друга;

– фиксировали максимальное усилие, затраченное на разрушение образца сварного соединения;

– определяли тип разрушения по ГОСТ Р 58121.3-2018.

Статистическую обработку результатов измерений выполняли по ГОСТ 14359-1969 с применением программного обеспечения STATISTICA. Для аппроксимации результатов эксперимента и получения аналитических зависимостей использовали MATHCAD.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 6 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости глубины внедрения торца ультразвукового инструмента и усилия отрыва материала от времени воздействия ультразвука. Как следует из рисунка, глубина внедрения торца инструмента пропорциональна времени воздействия ультразвука на свариваемые материалы и определяется в основном временем расплавления материала и его вытеснения под действием усилия подачи ультразвукового инструмента. Зависимость усилия отрыва материала от времени воздействия ультразвука носит иной характер и не является линейной.

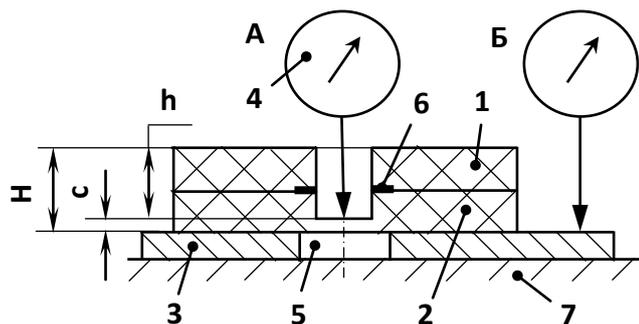


Рис. 4. Схема измерения толщины «дна» при помощи стойки типа С-IV:

1 и 2 – верхняя и нижняя пластины сварного соединения соответственно;

3 – металлическая плоскопараллельная пластина;

4 – индикаторная головка типа ИЧ-10, жестко закрепленная на стойке типа С-IV; 5 – отверстие в пластине;

6 – сварной шов; 7 – опорный столик стойки типа С-IV; H – общая толщина пластин в сварном соединении;

h – глубина внедрения рабочего торца СИ; c – толщина «дна»; А – положение измерения; Б – положение установки «нуля»

Fig. 4. The scheme for measuring the thickness of the “bottom” using a C-IV type stand:

1 and 2 – the upper and lower welded joint plates respectively; 3 – the metal plane-parallel plate;

4 – ICh-10 type detecting head rigidly fixed on the C-IV type stand; 5 – a hole in the plate;

6 – a welded joint; 7 – the support table of the C-IV type stand;

H – total thickness of the plates in a welded joint; h – the depth of WT working face penetration; c – the “bottom” thickness;

A – measurement location; Б – the location of “zero” setting

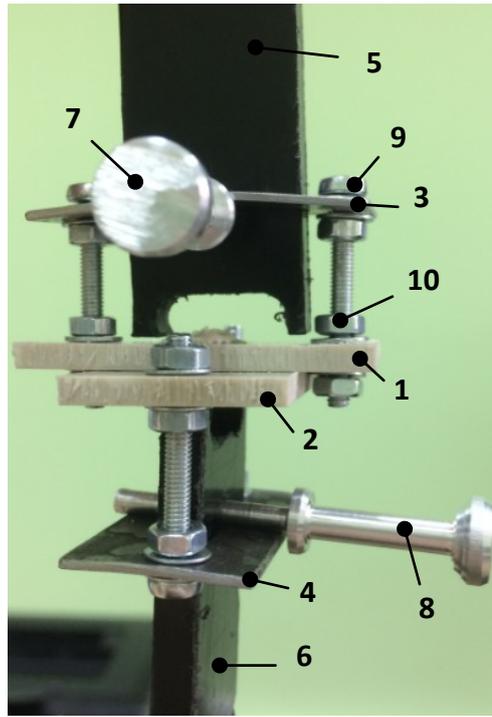


Рис. 5. Приспособление для крепления образца сварного соединения на разрывную машину:

1 и 2 – верхняя и нижняя пластины сварного соединения соответственно;

3 и 4 – верхняя и нижняя опорные металлические пластины;

5 и 6 – верхняя и нижняя зажимные пластины;

7 и 8 – опорные пальцы; 9 – регулировочный винт; 10 – крепежные гайки

Fig. 5. A device for fixing a welded joint sample on a tensile testing machine:

1 and 2 – the upper and lower welded joint plates respectively;

3 and 4 – the upper and lower bearing metal plates; 5 and 6 – the upper and lower locking plates;

7 and 8 – the support pins; 9 – the adjusting screw; 10 – the anchor nuts

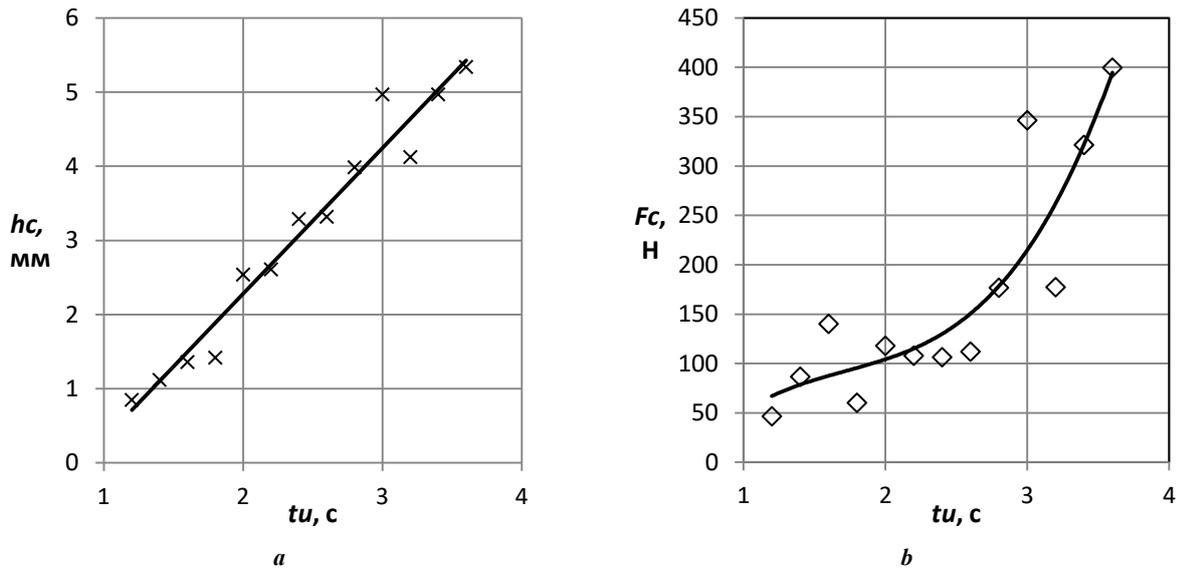


Рис. 6. Экспериментальные значения и аппроксимирующие их графические зависимости

глубины внедрения торца инструмента в материал (а)

и усилия отрыва материала (b) от времени воздействия ультразвука

Fig. 6. Experimental values and approximating them graphical dependences

of the depth of tool face penetration into the material (a)

and the force of material separation (b) on the ultrasound exposure time

На рис. 7 представлен график, построенный по экспериментальным значениям в координатах «усилие отрыва» – «глубина внедрения инструмента».

Как следует из анализа графика, при изменении глубины внедрения инструмента до 3,5 мм усилие отрыва материала меняется сравнительно плавно с 50 до 150 Н. При глубине внедрения инструмента свыше 3,5 мм наблюдается значительное увеличение усилия отрыва с 150 до 400 Н.

Во время испытаний было отмечено, что деформация в направлении приложения растягивающих усилий возрастает до предела текучести, затем почти сразу наступ

ает разрушение сварного соединения. Внешний вид и состояние образцов сварного соединения во время нагружения растягивающей силой в моменты ее максимального и минимального значений показаны на рис. 8. Из рисунка видно, что в момент приложения максимальной силы пластины сильно изогнулись (рис. 8 а).

Сварной шов деформируется, и с образованием шейки соединение разрушается. Тип разрушения пластический по всей поверхности отрыва. После отрыва растягивающее усилие исчезает, изгибные деформации снимаются, и пластины принимают первоначальное положение (рис. 8 б).

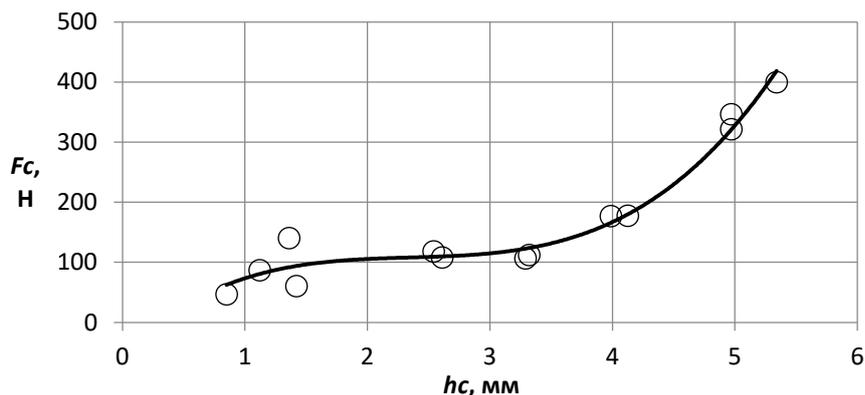


Рис. 7. Экспериментальные значения и аппроксимирующая их графическая зависимость усилия отрыва материала от глубины внедрения торца инструмента в материал при ультразвуковой сварке
Fig. 7. Experimental values and approximating them graphical dependence of the force of material separation on the depth of tool face penetration into the material during ultrasonic welding

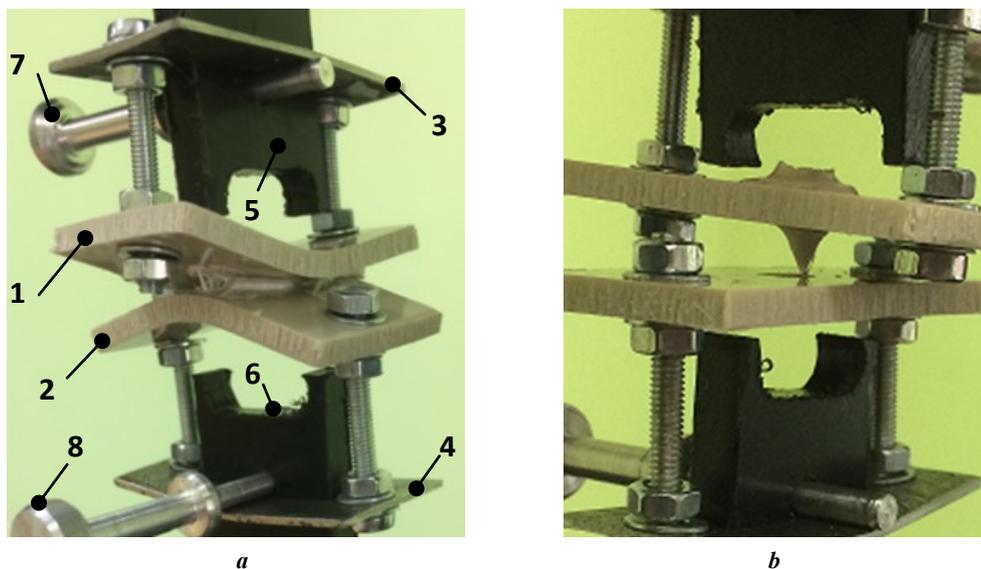


Рис. 8. Состояние образца при испытании:
a – в момент максимальной силы, отрывающей пластины сварного соединения друг от друга; **b** – в момент отрыва.
На рисунке: 1 и 2 – верхняя и нижняя пластины сварного соединения соответственно; 3 и 4 – верхняя и нижняя опорные металлические пластины; 5 и 6 – верхняя и нижняя зажимные пластины; 7 и 8 – опорные пальцы
Fig. 8. The state of the sample during testing:
a – at the moment of maximum force tearing the welded joint plates from each other; **b** – at the moment of tearing off.
In the figure: 1 and 2 – the upper and lower welded joint plates respectively; 3 and 4 – the upper and lower bearing metal plates; 5 and 6 – the upper and lower locking plates; 7 and 8 – the support pins

Объемная поверхность, по которой происходит разрушение сварного соединения в результате отрыва пластин друг от друга, визуально представляет собой совокупность множества выступов и впадин произвольной формы и размера.

На рис. 9 показан внешний вид поверхностей разрыва сварного соединения для образцов, когда глубина внедрения торца инструмента не превышает толщину пластины (рис. 9 а) и когда превышает (рис. 9 б). В первом случае глубина внедрения торца равна 2,64 мм, сила отрыва составляла 146,80 Н, а поверхность разрыва ограничена окружностью диаметром, практически равным диаметру торца СИ. Во втором случае глубина внедрения торца составляла 3,93 мм, сила отрыва равнялась 233,68 Н, а диаметр поверхности разрыва значительно больше. На рис. 9 б видны следы от течения расплава даже за пределы пластины.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа результатов следует, что с увеличением времени воздействия происходит повышение усилия отрыва, что обусловлено ростом номинальной площади взаимного перемешивания материала. Данный рост прочности сварных соединений был отмечен во многих работах [15–17], однако в них увеличение количества расплава происходит за счет применения энергетических концентраторов различной формы и размеров, которые повышают шероховатость соединяемых поверхностей [18; 19].

В нашем случае производилась ультразвуковая сварка полипропиленовых пластин с плоской глянцевой поверхностью контакта, имеющей низкую шероховатость. Учитывая, что толщины свариваемых образцов составляли 3 мм, а глубина внедрения инструмента более 5 мм, т. е. выше границы раздела образцов, увеличение площади

взаимного перемешивания, а соответственно и усилия отрыва, может быть обусловлено лишь течением расплавленного материала в зазор между контактными поверхностями соединяемых образцов в процессе сварки.

Полипропилен, хотя и является поликристаллическим материалом, очень мягкий и способен образовывать механическое поверхностное соединение даже при плохом плавлении [20]. Это обеспечивает хорошую адгезию расплавленного материала в зазоре между поверхностями пластин, и, следовательно, увеличение усилия отрыва. Исходя из этого, было бы очень полезно провести аналогичный эксперимент с использованием других материалов, например аморфного материала, такого как полистирол, и более твердого поликристаллического материала, такого как полифенилен-сульфид.

Кроме того, в работе не изучался вопрос влияния величины зазора между соединяемыми деталями на количество и распространение затекающего в него расплава материала, что представляет практический интерес с точки зрения сборки деталей перед ультразвуковой сваркой.

Течение расплавленного полипропилена вверх по стенкам рабочего инструмента в сторону, противоположную направлению его внедрения, и затекание материала в зазор между соединяемыми пластинами, по видимому, обусловлено снижением силы трения за счет высокочастотных колебаний, которые способствуют формированию поверхностных бегущих волн Релея. Наблюдаемое явление может применяться на практике для ультразвуковой сварки изделий из полипропилена без применения энергетических концентраторов, что упростит конструкцию соединяемых частей, и, следовательно, способы их изготовления. Однако данный вопрос требует более детального изучения и установления количественных зависимостей скорости течения материала от амплитуды, частоты колебаний и других параметров ультразвука.

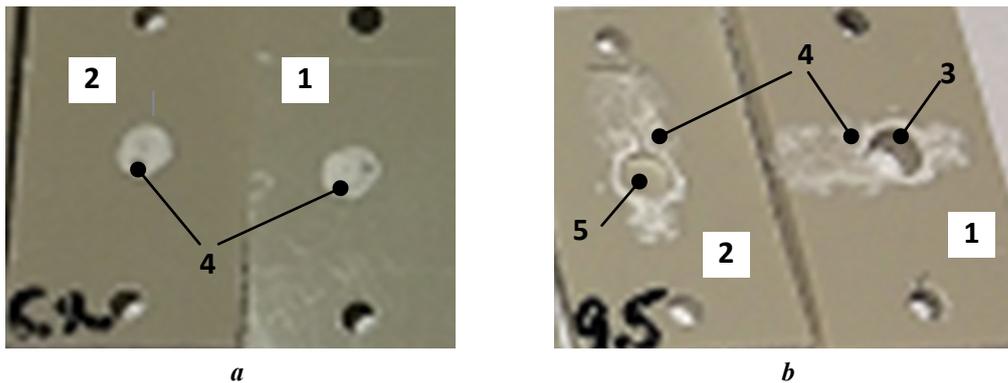


Рис. 9. Характерный вид поверхности разрыва сварного соединения после отрыва пластин друг от друга:

а – образец сварного соединения № 6.2 ($t_n=2,2$ с; $h=2,64$ мм; $F=146,80$ Н);

б – образец сварного соединения № 9.5 ($t_n=2,8$ с; $h=3,93$ мм; $F=233,68$ Н).

На рисунке: 1 и 2 – верхняя и нижняя пластины сварного соединения соответственно;

3 – поверхность сквозного отверстия, образовавшегося в результате внедрения торца СИ на глубину 3,93 мм;

4 – поверхности разрыва соединения; 5 – углубление в виде глухого отверстия

Fig. 9. Typical view of the welded joint fracture surface after separation of the plates from each other:

a – welded joint sample No. 6.2 ($t_n=2.2$ s; $h=2.64$ mm; $F=146.80$ N);

b – welded joint sample No. 9.5 ($t_n=2.8$ s; $h=3.93$ mm; $F=233.68$ N).

In the figure: 1 and 2 – the upper and lower welded joint plates respectively;

3 – the surface of a through hole formed as a result of WT face penetration to a depth of 3.93 mm;

4 – joint fracture surfaces; 5 – a dimple in the form of a recess hole

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Зависимость глубины внедрения торца ультразвукового инструмента прямо пропорциональна времени воздействия ультразвука при сварке полипропилена.

2. Зависимость усилия отрыва сварного соединения материалов, сваренных ультразвуком внахлест, от времени воздействия ультразвука имеет нелинейный характер и резко увеличивается при достижении определенного времени воздействия ультразвука.

3. При увеличении глубины внедрения торца инструмента до границы раздела пластин прочность сварного соединения плавно возрастает, а за границей раздела темп роста прочности повышается.

4. Прочность сварного соединения возрастает при увеличении количества расплава, находящегося между контактируемыми поверхностями пластин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С.С., Малолетков А.В., Коберник Н.В. Особенности образования сварных соединений при ультразвуковой сварке пластмасс // Сварочное производство. 2018. № 2. С. 50–55. EDN: [MIEUZF](#).
2. Волков С.С., Ремизов А.Л., Шестель Л.А. Разработка систем автоматического управления процессом ультразвуковой сварки пластмасс // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 12. С. 376–440. DOI: [10.18698/0536-1044-2017-12-37-44](#).
3. Комаров Г.В. Новые достижения в области сварки полимерных материалов // Полимерные материалы. 2017. № 9. С. 44–49.
4. Unnikrishnan T.G., Kavan P. A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 56. № 6. P. 3294–3300. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.09.540](#).
5. Комаров Г.В. Некоторые тенденции в сварке полимерных материалов // Полимерные материалы. 2018. № 9. С. 56–59.
6. Rajput Ch., Kumari S., Prajapati V., Dinbandhu, Abhishek K. Experimental investigation on peel strength during ultrasonic welding of polypropylene H110MA // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 26. № 2. P. 1302–1305. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.02.259](#).
7. Nikoi R., Sheikhi M.M., Arab N.B.M. Experimental analysis of effects of ultrasonic welding on weld strength of polypropylene composite samples // International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28. № 3. P. 447–453.
8. Raza S.F., Khan S.A., Mughal M.P. Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 103. P. 2053–2067. DOI: [10.1007/s00170-019-03681-7](#).
9. Liu S.-J., Chang I.-T., Hung S.-W. Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites // Polymer Composites. 2004. Vol. 22. № 1. P. 132–141. DOI: [10.1002/pc.10525](#).
10. Fu X., Yuan X., Li G., Wu Y., Tong H., Kang S., Luo J., Pan Z., Lu W. A study on ultrasonic welding of thermoplastics with significant differences in physical properties under different process parameters // Materials Today Communications. 2022. Vol. 33. Article number 105009. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2022.105009](#).

11. Chinnadurai T., Prabakaran N., Mohan Raj N., Pandian M.K. Ultrasonically welded and non-welded polypropylene and PC-ABS blend thermal analysis // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Vol. 132. P. 1813–1824. DOI: [10.1007/s10973-018-7052-y](#).
12. Мозговой И.В., Нелин А.Г., Давидан Г.М., Мозговой Е.И., Мозговой О.И. Исследование воздействия энергетических полей на полиэтилен // Омский научный вестник. 2006. № 10. С. 76–84. EDN: [HGKGXS](#).
13. Chinnadurai T., Arungalai Vendan S., Rusu C.C., Scutelnicu E. Experimental investigations on the polypropylene behavior during ultrasonic welding // Materials and Manufacturing Processes. 2018. Vol. 33. № 7. P. 718–726. DOI: [10.1080/10426914.2017.1303155](#).
14. Tao W., Su X., Wang H., Zhang Z., Li H., Chen J. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding // Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 37. P. 196–202. DOI: [10.1016/j.jmapro.2018.11.002](#).
15. Zhao T., Broek Ch., Palardy G., Fernandez Villegas I., Benedictus R. Towards robust sequential ultrasonic spot welding of thermoplastic composites: Welding process control strategy for consistent weld quality // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2018. Vol. 109. P. 355–367. DOI: [10.1016/j.compositesa.2018.03.024](#).
16. Волков С.С., Неровный В.М., Шестель Л.А. Влияние концентрации тепловой энергии на прочность поверхностей при ультразвуковой сварке пластмасс // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1. С. 63–70. DOI: [10.18698/0536-1044-2018-1-63-70](#).
17. Клубович В.В., Клушин В.А., Хрущев Е.В., Марусич В.И. Исследование ультразвуковой сварки полимеров // Металлургия машиностроения. 2017. № 5. С. 31–40. EDN: [XFGRXL](#).
18. Волков С.С., Прилуцкий М.А. Влияние шероховатости свариваемых поверхностей на качество их соединения при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 2. С. 53–58. EDN: [VKQDNV](#).
19. Marcus M., Wenning J., Parsons J., Savitski A. Comparative analysis of energy director styles on polybutylene terephthalate with servo-driven ultrasonic welder // SPE ANTEC Indianapolis. USA: JW Marriott Indianapolis, 2016. P. 1266–1273.
20. Marcus M., Cohn H., Drechsler J., Grodek D., Savitski A. Development of an approach to determine minimum amplitude required for ultrasonic welding // SPE ANTEC Indianapolis. USA: JW Marriott Indianapolis, 2017. P. 39–44.

REFERENCES

1. Volkov S.S., Maloletkov A.V., Kobernik N.V. Peculiarities of formation of welded joints in ultrasonic welding of plastics. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2018, no. 2, pp. 50–55. EDN: [MIEUZF](#).
2. Volkov S.S., Remizov A.L., Shestel L.A. Developing systems for automatic control of the process of ultrasonic welding of plastic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2017, no. 12,

- pp. 376–440. DOI: [10.18698/0536-1044-2017-12-37-44](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-12-37-44).
3. Komarov G.V. New progress in the field of welding polymeric materials. *Polimernye materialy*, 2017, no. 9, pp. 44–49.
 4. Unnikrishnan T.G., Kavan P. A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 56, no. 6, pp. 3294–3300. DOI: [10.1016/j.matpr.2021.09.540](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.540).
 5. Komarov G.V. Some trends in welding polymeric materials. *Polimernye materialy*, 2018, no. 9, pp. 56–59.
 6. Rajput Ch., Kumari S., Prajapati V., Dinbandhu, Abhishek K. Experimental investigation on peel strength during ultrasonic welding of polypropylene H110MA. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 1302–1305. DOI: [10.1016/j.matpr.2020.02.259](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.259).
 7. Nikoi R., Sheikhi M.M., Arab N.B.M. Experimental analysis of effects of ultrasonic welding on weld strength of polypropylene composite samples. *International Journal of Engineering*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 447–453.
 8. Raza S.F., Khan S.A., Mughal M.P. Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 2053–2067. DOI: [10.1007/s00170-019-03681-7](https://doi.org/10.1007/s00170-019-03681-7).
 9. Liu S.-J., Chang I.-T., Hung S.-W. Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites. *Polymer Composites*, 2004, vol. 22, no. 1, pp. 132–141. DOI: [10.1002/pc.10525](https://doi.org/10.1002/pc.10525).
 10. Fu X., Yuan X., Li G., Wu Y., Tong H., Kang S., Luo J., Pan Z., Lu W. A study on ultrasonic welding of thermoplastics with significant differences in physical properties under different process parameters. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 33, article number 105009. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2022.105009](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105009).
 11. Chinnadurai T., Prabaharan N., Mohan Raj N., Pandian M.K. Ultrasonically welded and non-welded polypropylene and PC-ABS blend thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, vol. 132, pp. 1813–1824. DOI: [10.1007/s10973-018-7052-y](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7052-y).
 12. Mozgovoy I.V., Nelin A.G., Davidan G.M., Mozgovoy E.I., Mozgovoy O.I. The study of the effect of energy fields on polypropylene. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2006, no. 10, pp. 76–84. EDN: [HGKXGS](https://www.edn.ru/10.18698/0536-1044-2017-12-37-44).
 13. Chinnadurai T., Arungalai Vendan S., Rusu C.C., Scutelnicu E. Experimental investigations on the polypropylene behavior during ultrasonic welding. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, vol. 33, no. 7, pp. 718–726. DOI: [10.1080/10426914.2017.1303155](https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1303155).
 14. Tao W., Su X., Wang H., Zhang Z., Li H., Chen J. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 37, pp. 196–202. DOI: [10.1016/j.jmapro.2018.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.002).
 15. Zhao T., Broek Ch., Palardy G., Fernandez Villegas I., Benedictus R. Towards robust sequential ultrasonic spot welding of thermoplastic composites: Welding process control strategy for consistent weld quality. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 109, pp. 355–367. DOI: [10.1016/j.compositesa.2018.03.024](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.024).
 16. Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Shestel L.A. The Effect of Thermal Energy Concentration on the Strength of Welded Surfaces in the Ultrasonic Welding of Plastics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2018, no. 1, pp. 63–70. DOI: [10.18698/0536-1044-2018-1-63-70](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-63-70).
 17. Klubovich V.V., Klushin V.A., Khrushchev E.V., Marusich V.I. The study of ultrasonic welding of polymers. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2017, no. 5, pp. 31–40. EDN: [XFGRLX](https://www.edn.ru/10.18698/0536-1044-2018-1-63-70).
 18. Volkov S.S., Prilutskiy M.A. The influence of the roughness of the welded surfaces on the quality of the weld when using ultrasonic welding of heterogeneous plastic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2016, no. 2, pp. 53–58. EDN: [VKQDNV](https://www.edn.ru/10.18698/0536-1044-2018-1-63-70).
 19. Marcus M., Wenning J., Parsons J., Savitski A. Comparative analysis of energy director styles on polybutylene terephthalate with servo-driven ultrasonic welder. *SPE ANTEC Indianapolis*. USA, JW Marriott Indianapolis Publ., 2016, pp. 1266–1273.
 20. Marcus M., Cohn H., Drechsler J., Grodek D., Savitski A. Development of an approach to determine minimum amplitude required for ultrasonic welding. *SPE ANTEC Indianapolis*. USA, JW Marriott Indianapolis Publ., 2017, pp. 39–44.

Statistical dependences of influence of ultrasonic exposure time on the strength and other parameters of a polypropylene welded joint

© 2023

Sergey V. Murashkin¹, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Nanotechnologies, Materials Science, and Mechanics”

Aleksandr S. Selivanov², PhD (Engineering), Director of the Institute of Mechanical Engineering**Nikolay G. Spiridonov**³, postgraduate student,

assistant of Chair “Nanotechnologies, Materials Science, and Mechanics”

Elena B. Savina⁴, master*Togliatti State University, Togliatti (Russia)**E-mail: selivas@inbox.ru¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9613-7313>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5267-0629>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2283-0104>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-6431>

Received 30.06.2022

Accepted 21.03.2023

Abstract: Polypropylene is one of the most popular thermoplastic materials used in industry. To produce goods from this material, the ultrasonic welding method is often used. However, despite a large number of scientific papers, the influence of some parameters of the ultrasonic welding mode on the strength characteristics of polypropylene joints remains unstudied. The paper presents the results of experimental studies of contact spot ultrasonic welding of plates 3 mm thick made of 01003-26 grade polypropylene. The authors considered the process of gradual penetration of the ultrasonic tool working face into polypropylene to a depth equal to the total thickness of the welded plates. Statistical dependences of the depth of the tool face penetration into the material and the force of material separation on the ultrasound exposure time are obtained. The influence of the depth of the ultrasonic tool working face penetration on the tearing force of welded specimens is determined. A significant increase in the tearing force from 150 to 400 N was found at the tool penetration depth of more than 3.5 mm due to an increase in the nominal area of mutual mixing of the material between the welded plates caused by the flow of molten material into the gap. The authors proposed a hypothesis about the flow of the molten material in the direction opposite to the direction of penetration of the working tool by forming traveling Rayleigh waves. However, its confirmation requires additional studies of the influence of the ultrasonic welding mode parameters and the size of the gap between the parts to be joined on the rate of the molten material flow into the gap.

Keywords: ultrasonic welding of plastics; polypropylene; welded joint strength; welding tool working part; ultrasonic welding time; depth of penetration of an ultrasonic tool face.

For citation: Murashkin S.V., Selivanov A.S., Spiridonov N.G., Savina E.B. Statistical dependences of influence of ultrasonic exposure time on the strength and other parameters of a polypropylene welded joint. *Frontier Materials & Technologies*, 2023, no. 1, pp. 57–67. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-1-57-67.