

УДК 621.791.16

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-5-20-27

Технологические особенности ультразвуковой сварки полимерных пленок малых толщин

С.С. Волков, В.М. Неровный, И.В. Станкевич

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

Technological Features of Ultrasonic Welding of Thin Polymer Films

S.S. Volkov, V.M. Nerovnyi, I.V. StankevichBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: map@bmstu.ru, vmn@bmstu.ru, aplmex@yandex.ru



Обоснован выбор способа ультразвуковой сварки полимерных пленок малых толщин, отмечены его преимущества перед другими методами сварки. Разработана технология ультразвуковой сварки полимерных пленок малых толщин. Показано, что параметрами, определяющими производительность процесса ультразвуковой шовной сварки полимерных пленок, служат амплитуда колебаний волновода, сварочное статическое давление и скорость сварки с фиксированным зазором на вращающемся ролике-опоре с автостабилизацией толщины сварного шва. Рассмотрено влияние теплового режима сварки на остаточную толщину шва. С помощью ультразвука можно сваривать поверхности, покрытые различными веществами. Установлено, что ультразвуковые колебания не оказывают специфического влияния на свариваемость полимерных пленок, т. е. сварка ультразвуком является чисто тепловым процессом, использующим особый источник энергии — ультразвуковые колебания. Исследовано влияние опор на качество и прочность соединений при ультразвуковой сварке полимерных пленок. Отмечено, что применение активной опоры вместо пассивной значительно повышает прочность и производительность сварки.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, полимерные пленки, сварочное статическое давление, фиксированный зазор, волновод-инструмент, амплитуда колебаний



In this paper, the choice of ultrasonic welding of thin polymeric films is justified and the advantages of ultrasonic welding over other welding methods are noted. The technology for ultrasonic welding of polymeric films of small thickness is developed. It is shown that the amplitude of waveguide vibrations, static welding pressure and the welding speed with a fixed clearance on the rotating roller-support with self-adjusting weld thickness, are the parameters that determine efficiency of ultrasonic welding of polymeric films. The influence of the thermal conditions of the residual weld thickness is examined. Ultrasonic welding can be used on surfaces covered with various substances. It is determined that ultrasonic vibrations do not have a specific effect on the weldability of polymeric films, i.e. ultrasonic welding is a purely thermal process that uses a particular energy source – ultrasonic vibrations. The effect of supports on the quality and bonding strength of ultrasonic welding of polymeric films is studied. It is noted that when an active support is used instead of a passive one, the strength and efficiency of welding increases.

Keywords: ultrasonic welding, polymeric films, welding static pressure, fixed clearance, waveguide tool, vibration amplitude

Полимерные пленочные материалы находят все большее применение в медицинской, пищевой, химической и других отраслях современного производства [1]. Часто их используют при изготовлении ответственных пневматических конструкций, например, метеорологических зондов и крупногабаритных емкостей для хранения сыпучих продуктов питания.

В настоящее время разработано и выпускается большое количество полимерных пленочных материалов с разнообразным сочетанием физико-механических, термических, химических и реологических свойств [1, 2], что позволило применять их для укупорки пищевых и других продуктов. В связи с этим возникла необходимость создания прочного, герметичного, неразъемного соединения полимерных пленок (ПП).

Существует несколько методов создания неразъемных соединений. Одним из них является сварка, получившая широкое распространение. Выбор способа сварки зависит от толщины и свойств материала, серийности выпуска изделий, типа конструкции и предъявляемых к ней требований, а также условий проведения сварки. Для соединения ряда полимерных пленочных материалов эффективно использовать ультразвуковую сварку (УЗС) [3, 4].

УЗС можно рекомендовать в качестве способа сварки поликарбонатных, полипропиленовых, полиамидных и полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) однослойных пленок, для которых прочность сварных соединений на сдвиг составляет не менее 60 % прочности основного материала. Хуже свариваются пленки из полиэтилена низкого и высокого давления, где прочность соединений на сдвиг не превышает 25...30 % прочности основного материала [3, 5].

УЗС в основном применяют для соединения ориентированных пленок: полимерных (особенно ПЭТФ), полиамидных типа ПК-4 и полипропиленовых малых толщин.

ПЭТФ-пленку практически нельзя сваривать другими методами. УЗС выполняют при температуре ниже температуры плавления материала, в результате чего незначительно нарушается ориентация пленки, определяющая ее ценные свойства [3, 6].

Получить соединение ПП толщиной менее 200 мкм по общепринятой схеме с металлической опорой трудно, а зачастую и просто невозможно вследствие того, что волновод-инструмент (далее волновод) и опора являются

для свариваемого материала источниками интенсивного теплоотвода. В этом случае необходимо либо подогревать поверхность волновода и опоры, либо вводить дополнительные теплоизоляционные прокладки. При точечной сварке ПП толщиной 200 мкм целесообразно использовать верхнюю прокладку (между волноводом и ПП) и заменять металлический материал опоры текстолитовым [7].

Цель работы — получение высококачественных соединений при УЗС ПП малых толщин.

Результаты исследований, проведенных за последние годы на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана по разработке метода УЗС ПП малых толщин, показали его преимущества перед другими способами сварки (нагретым газом или инструментом, расплавом, экструзией, токами высокой частоты, инфракрасным излучением и световым лучом), а также выявили области его применения в промышленности.

С помощью ультразвука можно выполнять сварку изделий, поверхности которых покрыты растворами солей, пищевых кислот, маслом и т. д. При этом нагревают только ту незначительную по глубине и ширине часть внутренней поверхности соединяемых полимерных материалов, которая предназначена для сварки. Это очень важно для тары с пищевыми продуктами и горючими веществами, так как позволяет исключить возможность разогрева ее содержимого. Поверхность деталей не подвергается предварительной обработке. В отличие от сварки токами высокой частоты УЗС не требует значительного электрического коэффициента потерь у связываемых материалов. Достаточная абсорбционная способность, присущая почти всем термопластичным полимерным материалам, позволяет соединять их ультразвуком [3, 8].

Основными параметрами процесса УЗС ПП являются: амплитуда колебаний волновода, определяющая при заданной постоянной частоте энергию вводимых в материал колебаний; сварочное статическое давление; скорость перемещения свариваемого материала под волноводом или время пропускания ультразвукового импульса; зазор, установленный между рабочим торцом волновода и опорой, на которой размещен свариваемый материал; материал и форма рабочего торца волновода; частота ультразвуковых колебаний [3, 9].

Для соединения ПП малых толщин можно применять как ручную УЗС (скользящим инструментом), так и непрерывную механизированную. Шовно-шаговая УЗС обеспечивает небольшую производительность процесса, поэтому основное внимание уделяется исследованию шовной УЗС «на протяг» и на вращающемся ролике-опоре. При этом, как правило, сварка выполняется с фиксированным зазором. Однако в случае УЗС пленок, имеющих в исходном состоянии разнотолщинность, с чем довольно часто приходится сталкиваться на практике, сварка по последней схеме приводит к появлению брака. Это объясняется тем, что в местах, где суммарная толщина ПП оказывается меньше номинальной толщины, исходя из которой установлен зазор между рабочим торцом волновода и опорой, образуется непровар, а в местах с большей суммарной толщиной — прожог пленки.

В связи с этим наиболее перспективной следует считать шовную сварку на вращающемся ролике-опоре с постоянным сварочным статическим давлением $p_{ст}$. Сварные соединения ПП (рис. 1) подразделяют на нахлесточные и Т-образные, работающие соответственно на сдвиг и расслаивание (последние могут выполняться с накладкой).

Прочность сварного соединения при использовании оптимальных режимов УЗС определяется главным образом характером распределения напряжений при его работе и свойствами полимерного материала. Характер распределения напряжений в сварных соединениях показан на рис. 2, причем коэффициенты концентрации напряжений в различных точках соединения (см. рис. 1) равны.

Как видно из рис. 2, у нахлесточных соединений самым опасным является сечение I–I

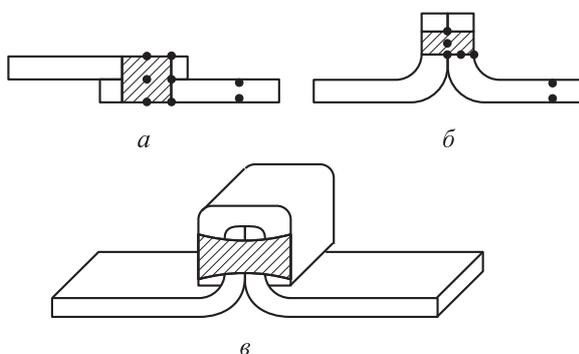


Рис. 1. Виды сварных соединений ПП: а — нахлесточное; б — Т-образное; в — Т-образное с накладкой

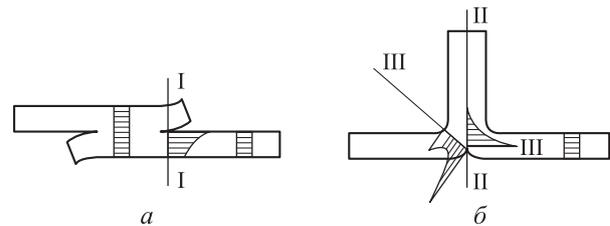


Рис. 2. Характер распределения напряжений в нахлесточных (а) и Т-образных (б) сварных соединениях

(так как здесь напряжения распределены неравномерно, причем шов является их концентратором, а околошовная зона — опасным сечением), а у Т-образных соединений — сечение II–III, находящееся в сложнонапряженном состоянии. Значение коэффициентов концентрации напряжений у Т-образных соединений значительно больше, чем у нахлесточных, что и обуславливает его пониженную прочность.

Установленный характер распределения напряжений позволил сделать вывод [5], что у ПП малых толщин, характеризуемых достаточно большой гибкостью макромолекул, высокой скоростью изменения их формы и способностью быстро релаксировать, прочность соединений должна быть значительно выше, чем у ПП из жесткоцепных и сильнополярных полимеров, в которых релаксационные процессы замедлены. Основной особенностью способа УЗС ПП при постоянном сварочном статическом давлении является деформация материала под рабочим торцом волновода, обусловленная термоползучестью и выдавливанием пластицированного материала из сварочной зоны [5, 10].

При поддержании заданных условий УЗС и сварочного статического давления $p_{ст}$ наблюдается явление, названное автостабилизацией толщины шва [3]. В этом случае толщина шва остается постоянной и практически не зависит от исходной толщины соединяемых пленок в диапазоне тех режимов УЗС, которые изучались авторами.

Явление автостабилизации толщины шва, по-видимому, можно объяснить следующим образом. В процессе термоползучести и вытеснения пластицированного материала происходит приближение холодного рабочего торца волновода к зоне максимального тепловыделения. Это вызывает увеличение теплоотвода из сварочной зоны. При некотором определенном значении толщины шва устанавливается динамическое равновесие между тепловыделением и

теплоотводом или даже количество отводимой теплоты превалирует над количеством теплоты, выделяющейся вследствие гистерезисных потерь. В результате температура в сварочной зоне становится меньше температуры вязкотекучего состояния, и дальнейшее утонение шва прекращается [3, 6].

Значительное влияние теплоотвода на этот процесс также подтверждено данными, приведенными на рис. 3. Наибольшее значение толщины шва $h_{ш}$ соответствует сварке на вращающемся ролике-опоре (частота его вращения $\omega \neq 0$), так как в этом случае в контакт с материалом постоянно вступают его холодные участки ролика-опоры. При сварке на неподвижном ролике-опоре ($\omega = 0$) условия теплоотвода ухудшаются вследствие его разогрева в точке контакта с материалом, что приводит к уменьшению толщины шва. Наибольшее утонение происходит при использовании нижних или верхних теплоизоляционных прокладок 3, помещаемых между пленкой 2 и роликом-опорой 4 (рис. 3, в) или между волноводом 1 и пленкой (рис. 3, г). Наименьшая толщина достигается в случае, показанном на рис. 3, г, что свидетельствует о превалировании в этом процессе теплоотвода в волновод.

При использовании теплоизоляционных прокладок происходит практически полное пе-

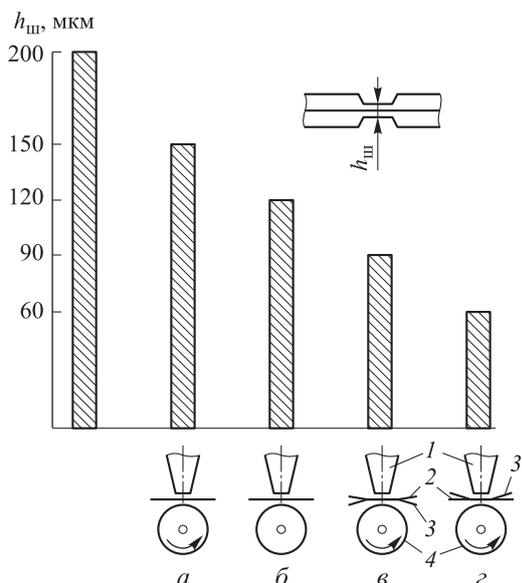


Рис. 3. Зависимость толщины шва $h_{ш}$, полученного сваркой двух слоев ПП толщиной 200 мкм при давлении $p_{ст} = const$, от режима УЗС: а — на вращающемся ролике-опоре ($\omega \neq 0$); б — на неподвижном ролике-опоре ($\omega = 0$); в и г — с использованием нижней и верхней теплоизоляционной прокладки ($\omega \neq 0$)

редавливание связываемых пленок, причем по обе стороны от места ввода ультразвуковых колебаний образуются два автономных соединения вследствие вытесненного из сварочной зоны материала.

Утонение материала в зоне шва оказывает значительное влияние на его прочность. Испытание соединения на сдвиг (рис. 4, а) показало, что его прочность довольно низкая, так как нагрузку воспринимает значительно ослабленное сечение А–А. Кроме того, в месте перехода от утолщения к тонкому шву возникает концентрация напряжений [10], что также приводит к ослаблению соединения.

При испытании сварного соединения на расслаивание (рис. 4, б), наоборот, наибольшая прочность достигается при полном выдавливании материала из зоны ввода ультразвуковых колебаний, когда образуются два автономных соединения. При этом нагрузку воспринимает утолщенная часть соединения, которую некоторые исследователи называют «сварочной гусеницей». В случае УЗС с автостабилизацией толщины шва нестабильность этого режима и, в частности, непостоянство скорости сварки и толщины свариваемых пленок не оказывают существенного влияния на прочность соединения. При этом его прочность на расслаивание в достаточно широком диапазоне режимов УЗС остается практически неизменной.

Производительность сварки ПП возрастает с повышением частоты и амплитуды колебаний волновода, а также с понижением температуры вязкотекучего состояния ПП. Что касается влияния толщины пленки на скорость УЗС, то здесь следует учитывать два обстоятельства.

С одной стороны, с ростом толщины свариваемой пленки скорость УЗС должна уменьшаться. Однако при этом увеличивается количество механической энергии, рассеиваемой в материале, что должно привести к возрастанию скорости УЗС. В результате в некотором диапа-

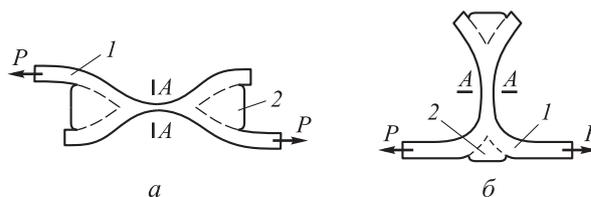


Рис. 4. Схема испытания сварного соединения на сдвиг (а) и расслаивание (б): 1 — свариваемая пленка; 2 — «сварочная гусеница»; P — усилие на разрыв

зоне толщин ПП скорость УЗС может не зависеть от толщины пленки. Действительно, такая зависимость наблюдается при сварке ПП толщиной более 150 мкм.

С другой стороны, для ПП малых толщин начинает сказываться теплоотвод в холодные волновод и опору. Это приводит к необходимости снижения скорости УЗС, а при очень тонких пленках соединение вообще может не образовываться, так как количество выделяющейся энергии будет равно или меньше количества отводимой энергии. Детальное исследование влияния толщины и материала ПП на рассеивание механической энергии при УЗС проведено авторами в работах [7, 8].

Вследствие невозможности прямого измерения энергии, вводимой в пленку при УЗС, использовали метод ее косвенной оценки по коэффициенту рассеивания механической энергии при ударе [9]. Для этого определяли коэффициент восстановления при прямом центральном ударе стального шара о ПП, расположенную на массивной металлической подложке-опоре. Энергия, рассеянная за один цикл изменения напряжения, определяется выражением

$$\Delta E = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (1 - K^2) v^2,$$

где m_1 — масса шара; m_2 — масса пленки и плиты, на которой она размещена; K — коэффициент восстановления, $K = \sqrt{h_2/h_1}$ (h_2 и h_1 — высота отскока и падения шара); v — скорость шара в момент удара.

В качестве критерия свариваемости в работе [7] предложено отношение ΔE к максимальной кинетической энергии падающего шара $E = m_1 v^2 / 2$, названное коэффициентом рассеивания энергии:

$$\psi = \frac{\Delta E}{E} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (1 - K^2).$$

Для оценки относительного уменьшения вводимой энергии при малых толщинах можно условно принять коэффициент ввода энергии

$$\alpha_h = \psi_h / \psi_{100},$$

где ψ_h и ψ_{100} — коэффициент рассеивания пленки толщиной h и 100 мкм.

Зависимость коэффициента рассеивания энергии ψ системы ПЭТФ-пленка-опора и коэффициента ввода энергии α_h от толщины ПП приведена на рис. 5, где видно, что для ПП толщиной 25 мкм мощность теплообразования за

один цикл нагружения в 10 раз меньше, чем для ПП толщиной 60 мкм. Такое существенное уменьшение теплообразования в тонких пленках может предопределять их пониженную свариваемость (даже без учета явлений теплоотдачи). Резкое уменьшение коэффициентов ψ и α_h наблюдается при толщине ПП менее 60 мкм.

В зависимости от значения коэффициента рассеивания энергии пленки можно разбить на три группы [3]: 1) ПП с большими потерями ($\psi > 0,81$) — из полиэтилена низкой и высокой плотности; 2) ПП со средними потерями ($0,4 < \psi < 0,8$) — поликарбонатные, полиамидные, полипропиленовые; 3) пленки с малыми потерями ($\psi < 0,4$) — ПЭТФ-пленки.

Следует отметить, что при сварке скользящим инструментом большая рассеивающая способность материала пленок препятствует получению качественных соединений. Это объясняется увеличением деформации поверхности пленки под волноводом с ростом ψ . Поэтому, например, при УЗС полиэтиленовых пленок их поверхность повреждается настолько сильно, что их нельзя сваривать скользящим инструментом.

Одним из основных преимуществ УЗС является возможность соединений ориентированных ПП, особенно из ПЭТФ-пленки, которые практически не свариваются другими методами, в частности тепловыми, так как длительное воздействие высоких температур приводит к нарушению молекулярной ориентации и повышению степени кристалличности, т. е. к потере пленками их ценных свойств. Это подтверждено сравнением данных измерения молекулярной ориентации акустическим методом [10] по изменению скорости звука в исходном материале и сварных швах, полученных ультра-

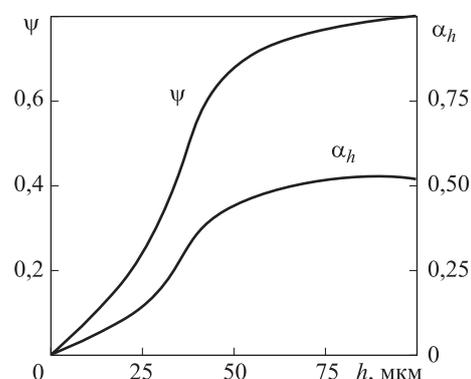


Рис. 5. Зависимость коэффициента рассеивания энергии ψ системы ПЭТФ-пленка-опора и коэффициента ввода энергии α_h от толщины h ПП

звуковой и термоимпульсной сваркой. В работе [10] показано, что скорость звука в швах, выполненных термоимпульсной сваркой, на 37 % меньше, чем в исходной пленке, в то время как после УЗС она понижается на 9 и 11 % для ПЭТФ-пленки толщиной 100 и 140 мкм соответственно.

При сварке ПП следует обращать внимание на геометрические размеры и форму заточки рабочего торца волновода. Оптимальной является заточка типа «отвертки» с радиусом закругления около 1 мм [5]. При большем радиусе требуется значительное усилие прижима для создания необходимого сварочного статического давления. УЗС может осуществляться как широкой, так и узкой гранью «отвертки», однако в последнем случае больше вероятность подрезов материала в околошовной зоне.

Авторы работы [7] считают более целесообразной сферическую заточку рабочего торца волновода. Такая форма позволяет проводить УЗС пленок с наименьшим ослаблением околошовной зоны и более равномерно передавать усилие прижатия на свариваемый образец. Применение сферической заточки позволило, например, повысить прочность при раслаивании сварных соединений из полиамидной пленки ПА-4 с 30 до 49 % прочности основного материала при скорости УЗС 0,03 м/с и амплитуде колебаний волновода 30 мкм.

Значительное влияние на свариваемость ПП малых толщин оказывают материал и геометрические размеры опоры, на которой размещены пленки.

Опоры ультразвуковых сварочных машин подразделяют на активные, отражающие колебания, и пассивные, поглощающие энергию колебаний. Активные опоры могут быть полу- и четвертьволновыми. Для изготовления активных опор обычно используют материалы, обладающие хорошими прочностными и акустическими свойствами.

В качестве таких материалов применяют алюминиевые Д16Т и титановые ВТ1 сплавы, а также стали Ст3 и Ст45 [3, 7]. Однако предпочтение следует отдавать опорам из Ст3, так как отличие акустического сопротивления свариваемой пленки от такового для стали больше, чем для указанных сплавов. Это обуславливает большее значение энергии, отражающейся от опоры и возвращающейся в свариваемые пленки.

Результаты экспериментов показали [7], что при использовании четвертьволновых опор

скорость УЗС значительно повышается. Это объясняется тем, что при применении активных опор образуется стоячая волна, пучность которой совпадает с плоскостью контакта свариваемых пленок малых толщин.

При УЗС на пассивных опорах, выполненных из дерева или резины, даже в случае очень малой скорости перемещения ПП под волноводом прочность шва получается низкой.

Улучшение свариваемости тонких пленок достигается увеличением толщины свариваемого материала, для чего можно использовать прокладки, изготовленные из того же или другого материала, имеющего температуру текучести больше, чем у ПП. Прокладку располагают либо между волноводом и пленкой, либо между пленкой и опорой.

На качество соединения существенное влияние оказывает не только место расположения прокладки, но и ее материал. В таблице приведены значения прочности при раслаивании сварных соединений из ПЭТФ-пленки толщиной 100 мкм, выполненных с прокладками из различных материалов, расположенными между волноводом и пленкой.

Из приведенных в таблице данных следует, что сварка с применением прокладок позволяет повысить прочность соединения почти в 2 раза. Швы при этом имеют гладкую поверхность и прозрачны.

В случаях, когда нежелательно использовать прокладку, привариваемую к пленке в зоне УЗС, следует применять материалы, которые, обеспечивая наибольшую прочность соединения, легко отделяются от шва после сварки. Этим требованиям отвечают прокладки из бумаги толщиной 50...60 мкм, гарантирующие прочность соединения, равную 55...60 % прочности основного материала. Использование бумаги с пропиткой, кальки или парафинированной оберточной бумаги является нежела-

Значения прочности при раслаивании сварных соединений из ПЭТФ-пленки, выполненных с прокладками из различных материалов

Материал прокладки	Толщина прокладки, мкм	Прочность при раслаивании, МПа
Целлофан	60	1,8
Фторопласт-4	60	1,5
ПЭТФ-пленка	35	2,0
Бумага	50	2,2

тельным, так как они прилипают к пленке и при их удалении возможно повреждение соединения.

Выводы

1. Рассмотрено влияние теплового режима УЗС на остаточную толщину шва ПП при высокой производительности процесса и отсутствии деструкции свариваемых пленок.

2. Приведена кинетика образования сварных соединений и околошовной зоны ПП малых

толщин, полученных при различных значениях сварочного статического давления, амплитуды колебаний волновода и скорости УЗС.

3. Для повышения прочности и качества шва, а также для уменьшения теплоотвода в волновод и опору рекомендовано применять теплоизоляционные прокладки из целлофана и бумаги.

4. Прочность сварных соединений ПП малых толщин при изменении как скорости УЗС, так и фиксированного зазора составляет 60...70 % прочности основного материала.

Литература

- [1] Крыжановский В.К., Бурлов В.В. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [2] Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва, Научный мир, 2007. 576 с.
- [3] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [4] Fomenko A.F., Volkov S.S. Ultrasound welding of polymer multilayered film materials. *Welding International*, 2004, vol. 15(7), pp. 583–584.
- [5] Волков С.С., Шестель Л.А., Соколов В.А. Разработка процесса ультразвуковой сварки изделий из полиэтилентерефталатных пленок. *Сварка и диагностика*, 2013, № 2, с. 58–62.
- [6] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [7] Волков С.С., Бигус Г.А., Ремизов А.Л. Применение пьезокерамических преобразователей для ультразвуковой сварки полимерных пленок. *Сварка и диагностика*, 2016, № 2, с. 53–57.
- [8] Sannikov D.V., Volkov S.S. Ultrasound cutting of polymer materials. *Welding International*, 2002, vol. 16(3), pp. 237–239.
- [9] Volkov S.S., Chesnokov A.A., Garanin I.N. Relationship of the kinetic characteristic and strength of butt joints in the ultrasound welding of rigid plastics. *Welding International*, 2000, no. 14(10), pp. 822–824.
- [10] Volkov S.S., Orlov Yu.N., Garanin I.N. Main Methods and Technological Features of Welding Dissimilar Plastics. *Welding International*, 2008, vol. 22(3), pp. 193–197.

References

- [1] Kryzhanovskii V.K., Burlov V.V. *Tekhnicheskie svoistva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Petersburg, Professii publ., 2005. 235 p.
- [2] Tager A.A. *Fiziko-khimiia polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchnyi mir publ., 2007. 576 p.
- [3] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiia publ., 2001. 376 p.
- [4] Fomenko A.F., Volkov S.S. Ultrasound welding of polymer multilayered film materials. *Welding International*, 2004, vol. 15(7), pp. 583–584.
- [5] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Razrabotka protsessa ul'trazvukovoi svarki izdelii iz polietilentereftalatnykh plenok [Development of the process of ultrasonic welding of polyethylene terephthalate film products]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2013, no. 2, pp. 58–62.
- [6] Karkhin V.A. *Teplovyie protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt-Petersburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2013. 646 p.
- [7] Volkov S.S., Bigus G.A., Remizov A.L. Primenenie p'ezokeramicheskikh preobrazovatelei dlia ul'trazvukovoi svarki polimernykh plenok [Application of piezo ceramic transducers for ul-

- trasonic welding of polymer films]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2016, no. 2, pp. 53–57.
- [8] Sannikov D.V., Volkov S.S. Ultrasound cutting of polymer materials. *Welding International*, 2002, vol. 16(3), pp. 237–239.
- [9] Volkov S.S., Chesnokov A.A., Garanin I.N. Relationship of the kinetic characteristic and strength of butt joints in the ultrasound welding of rigid plastics. *Welding International*, 2000, no. 14(10), pp. 822–824.
- [10] Volkov S.S., Orlov Yu.N., Garanin I.N. Main Methods and Technological Features of Welding Dissimilar Plastics. *Welding International*, 2008, vol. 22(3), pp. 193–197.

Статья поступила в редакцию 30.11.2017

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).

НЕРОВНЫЙ Вячеслав Михайлович (Москва) — доктор 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: vmn@bmstu.ru).

СТАНКЕВИЧ Игорь Васильевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aplmex@yandex.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).

NEROVNYI Vyacheslav Michailovich (Moscow) — Doctor 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: vmn@bmstu.ru).

STANKEVICH Igor Vasilievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Applied Mathematics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aplmex@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Неровный В.М., Станкевич И.В. Технологические особенности ультразвуковой сварки полимерных пленок малых толщин. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 5, с. 20–27, doi: 10.18698/0536-1044-2018-5-20-27.

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Nerovnyi V.M., Stankevich I.V. Technological Features of Ultrasonic Welding of Thin Polymer Films. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 5, pp. 20–27, doi: 10.18698/0536-1044-2018-5-20-27.