

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-49-56

# Технологические особенности ультразвуковой сварки разнородных пластмасс

С.С. Волков, А.С. Панкратов, А.Л. Ремизов, А.В. Коновалов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Technological features of the heterogeneous plastics ultrasonic welding

S.S. Volkov, A.S. Pankratov, A.L. Remizov, A.V. Konovalov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены технологические особенности ультразвуковой сварки разнородных пластмасс, специфика которой проявляется в характере объемных взаимодействий. Результаты исследования механизма образования сварного соединения показали, что одновременно происходит перемешивание микрообъемов, взаимная диффузия молекул полимеров в контактирующих поверхностях и возникновение новых химических связей с образованием блок-сополимеров. Общим для этих процессов является то, что все они протекают в диапазоне температур, соответствующем вязкотекучему состоянию полимера. Экспериментально подтверждено, что одним из критериев свариваемости разнородных пластмасс является их совместимость по акустическим свойствам, оцениваемая плотностью и вязкостью расплава. Предложены технологические приемы, позволяющие компенсировать различия в акустических свойствах свариваемых материалов, и тем самым получать качественные сварные соединения. Определены четыре стадии механизма образования сварных соединений при ультразвуковой сварке разнородных пластмасс. Установлено, что физико-механические свойства разнородных пластмасс имеют первостепенное значение для механизма теплообразования при ультразвуковой сварке. Разработана ультразвуковая сварочная установка для сварки разнородных пластмасс в вакууме.

**Ключевые слова:** ультразвуковая сварка, разнородные пластмассы, статическое сварочное давление

The paper considers technological features of heterogeneous plastics ultrasonic welding, which specificity is manifested in the volumetric interaction nature. Results of studying the mechanism of a welded joint formation showed that micro-volumes mixing, polymer molecules mutual diffusion in the contacting surfaces and emergence of the new chemical bonds with the block copolymers formation were the simultaneous processes. Their common feature was that all these processes proceeded in the temperature range corresponding to the polymer viscous-flow state. It was experimentally confirmed that one of the criteria for weldability of the heterogeneous plastics was their compatibility in terms of acoustic properties being estimated by the melt density and viscosity. Technological methods were proposed making it possible to compensate for differences in the welded materials acoustic properties, and thereby obtain the high-quality welded joints. Four stages of the welded joints formation mechanism were determined during ultrasonic welding of the heterogeneous plastics. It was established that physical and mechanical properties of the heterogeneous plastics were playing a decisive role in the mechanism of heat generation during the ultra-

sonic welding. An ultrasonic welding unit for welding the heterogeneous plastics in vacuum was developed.

**Keywords:** ultrasonic welding, heterogeneous plastics, oscillation frequency, waveguide oscillation amplitude, static welding pressure

Рост производства полимерных материалов (ПМ) по объему и номенклатуре, расширение области их применения стимулируют развитие исследований, направленных на создание новых технологий изготовления изделий из пластмасс. При конструировании изделий из разнородных ПМ необходимо учитывать их физико-механические свойства [1, 2].

В некоторых случаях возникает необходимость создавать изделия, состоящие из разнородных ПМ, комплекс полезных свойств которых удовлетворяет поставленным требованиям [3, 4]. Исследования и теоретические обоснования проведены для таких пар разнородных материалов, как полистирол — поливинилхлорид, полистирол — полиметилметакрилат, полиметилметакрилат — поливинилхлорид [1, 2].

Вследствие различий в химическом строении, молекулярной массе, температурных и фазовых переходах существующие способы сварки для разнородных пластмасс не всегда позволяют получать качественное сварное соединение (СС). Одним из перспективных методов соединения элементов подобных конструкций является ультразвуковая сварка (УЗС) [5, 6].

Технологические особенности УЗС определяются коэффициентом механических потерь, модулем упругости материала, его демпфирующими свойствами и температурным интервалом вязкотекучего состояния ПМ [5, 7].

Однако во многих изделиях требуется такое сочетание свойств, которое не могут обеспечить отдельно взятые ПМ: в специальной одежде — теплостойкость и гигиенические характеристики; в полевой измерительной аппаратуре — температурно- и атмосферостойкость, высокая сопротивляемость ударным нагрузкам; в осветительной аппаратуре транспорта — прочность и прозрачность и т. п.

Совершенствование существующих и разработка новых способов УЗС, позволяющих соединять термопластичные материалы с различными физико-механическими свойствами, является актуальной задачей [5, 7]. При разработке технологии УЗС разнородных пластмасс необходимо решить следующие вопросы: со стороны какого материала вводить ультразвуковые

колебания; где и как выполнять разделку кромок; каким образом вводить энергию колебаний в месте соединения элементов с минимальными потерями; как взаимосвязаны размеры и геометрические параметры конструкций с физико-механическими свойствами полимеров [3, 6].

Цель исследования — разработать технологию и установить механизм образования СС при УЗС разнородных пластмасс.

Проблемы, возникающие при УЗС разнородных ПМ, можно разделить на две группы: общие характерные для всех видов сварки пластмасс, и специфические, присущие только УЗС. Очевидно, что без их анализа нельзя разработать технологические приемы сварки разнородных ПМ [1, 2, 4].

Основной проблемой, с которой приходится сталкиваться при любом способе сварки разнородных ПМ, является необходимость их смешения в переходной зоне от одного полимера к другому. О том, что такая зона смешения существует, свидетельствуют, в частности, экспериментальные исследования по УЗС ударопрочного полистирола и полиметилметакрилата, проведенные на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана [6, 8, 9]. По результатам исследования обнаружена значительная зона взаимного проникновения свариваемых ПМ.

Образование в переходной области смесей соединяемых полимеров указывает на то, что их совместимость должна быть одним из критериев свариваемости разнородных ПМ. Под совместимостью понимают способность ПМ создавать при конкретных параметрах (температуре, давлении концентрации) термодинамически устойчивую систему, состоящую из молекулярно-диспергированных компонентов [2].

Совместимость также можно оценить по плотности и вязкости расплавов, наличию в составе молярной доли сополимеров, превышающей 50, а иногда и 80 % идентичных звеньев [1–3]. При этом термодинамическая устойчивость определяется изменением изобарно-изотермического потенциала смеси.

Анализ изобарно-изотермического потенциала смеси показал, что в большинстве случаев

смеси полимеров оказываются термодинамически несовместимыми. Это означает, что такая смесь должна распадаться (расслаиваться) с течением времени, причем этот процесс ускоряется под действием внешних эксплуатационных факторов: температуры, напряжения и т. п. [2, 7, 10].

Несмотря на термодинамическую несовместимость полимеров, следует учитывать и чисто механические процессы их перемешивания, которые при надлежащем подборе технических средств можно довести до молекулярного уровня.

Хотя смесь и будет получаться термодинамически неустойчивой, она окажется пригодной, если изменение ее характеристик (например, прочности) за время эксплуатации не превысит допустимых значений. Таким образом, становится очевидной недостаточность использования только термодинамического подхода к анализу свариваемости разнородных ПМ, как это сделано в большинстве литературных источников [3, 7].

Известно, что основой механизма перемешивания жидкостей является конвекция [2, 5], заключающаяся в перемещении их капель из одной области в другую. При сварке конвективное смешение ПМ происходит за счет деформирования системы и возникающего вследствие деформационного сдвига течения расплава (сдвигового течения).

Преимущество УЗС перед другими видами сварки ПМ состоит в том, что при УЗС течение расплава происходит в турбулентном режиме, а не в ламинарном. Так как в течении должны участвовать обе контактирующие фазы, процесс смешения определяется соотношением значений вязкости расплавов и плотности фаз. Таким образом, несовпадение плотностей и вязкостей расплавов является следующей проблемой, возникающей при сварке разнородных ПМ [11, 12].

Еще одной проблемой является разница температур вязкотекучего состояния  $T_v$  или плавления кристаллической фазы  $T_{пл}$  свариваемых разнородных ПМ. В этом случае наблюдается перегрев материала с меньшей температурой  $T_v$  или  $T_{пл}$ , который может происходить до ее значения, при котором резко возрастает скорость термодеструкции.

Кроме того, развивающаяся при смешении ПМ деформация сдвига и его высокие напряжения неизбежно приводят к появлению механохимических процессов. Если суммарная сила

внешнего воздействия, приложенного к молекулярной цепи, окажется больше ее продольной прочности, то полимерная молекула может разорваться. Возникающие обрывки полимерной цепи являются свободными радикалами.

Эти свободные радикалы могут участвовать в процессах рекомбинации с образованием полимерной молекулы, мало отличающейся от исходной вследствие взаимодействия с молекулами кислорода и других низкомолекулярных веществ. Впервые эта особенность применительно к УЗС обнаружена специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана [6, 8, 10].

Во всех этих случаях решающую роль играют силы взаимодействия, связанные с вязкостью расплавов. Поэтому все факторы, увеличивающие вязкость (понижение температуры, повышение гидростатического давления), затрудняют сварку разнородных ПМ.

**Механизм образования СС при УЗС разнородных пластмасс** состоит из четырех стадий, что обусловлено природой ПМ и технологией УЗС [6, 13].

*На первой стадии* материалы в зоне контакта находятся в стеклообразном состоянии, которое характеризуется активацией свариваемых поверхностей вследствие повышения энергетического уровня макромолекул, что обусловлено гистерезисными потерями при циклическом деформировании.

*На второй стадии*, наступающей после перехода материалов на границе раздела в высокоэластичное состояние, поверхностные слои в контактирующих областях разрушаются и удаляются из зоны сварки в грат при течении расплава. В вязкотекучем состоянии происходит перемешивание макрообъемов свариваемых материалов, обусловленное неравномерным статическим и динамическим давлениями по плоскости контакта и «насосным» действием ультразвуковых колебаний. Диффузионные процессы происходят только внутри макрообъемов, не оказывая существенного влияния на образование СС.

*На третьей стадии*, наступающей после отключения ультразвуковых колебаний и протекающей до начала стеклования материала сварного шва, заканчивается образование СС. Эта стадия характеризуется диффузионными процессами на границах контакта макрообъемов, интенсивность которых падает с уменьшением температуры, а также образованием блоксополимера в результате комбинаций свобод-

ных макрорадикалов от разных материалов и возникновением внутренних напряжений.

На четвертой стадии (при температуре внешней среды) формируются свойства СС, зависящие от кинетических и морфологических особенностей образуемых надмолекулярных структур, процесса возникновения и релаксации внутренних напряжений в зоне сварного шва.

Такой механизм образования СС при УЗС разнородных ПМ служит основанием для создания новых технологических приемов (способов) сварки, позволяющих исключить влияние различия физико-механических свойств свариваемых пластмасс на рабочий процесс [2, 9].

Технологические приемы УЗС, позволяющие получать качественные СС разнородных пластмасс, заключаются в следующем: подборе свариваемых пар; определении температуры нагрева, при которой каждый из материалов имеет оптимальную текучесть в зоне сварного шва; введении низкомолекулярных добавок (растворителей) в зону сварки ПМ; использовании промежуточных прослоек (прокладок) из сополимеров, имеющих в своем составе мономерные звенья обоих связываемых полимеров; обеспечении реакции взаимодействия вводимого в зону шва полифункционального вещества с материалом соединяемых поверхностей (химическая сварка); применении вакуума в контролируемой атмосфере.

**Подбор свариваемых пар.** При конструировании изделий из ПМ важно правильно подобрать свариваемые пары. В первую очередь эти пары должны быть термодинамически совместимыми. Одним из необходимых условий образования прочного СС является создание в зоне контакта температур, близких к таковым для перехода из высокоэластичного состояния ПМ в вязкотекучее или превышающих температуры плавления.

Другим, не менее важным фактором, является обеспечение протекания диффузионных и реологических процессов перемешивания ПМ, которые возможны при совпадении показателей вязкости расплавов свариваемых материалов. При УЗС разнородных ПМ происходит интенсивное перемешивание макрообъемов расплавов соединяемых материалов, а диффузионные процессы являются сопутствующими и протекают по границам этих макрообъемов.

В противном случае даже динамическое воздействие ультразвуковых колебаний не может

обеспечить проникновения частиц менее вязкого расплава в область более вязкого. Выбрав за критерии свариваемости при УЗС разнородных ПМ соотношение интервалов температур вязкотекучего состояния (для кристаллических пластмасс — температуру плавления) и показатели вязкости расплавов при этих температурах, пары подобранных материалов можно разделить на четыре группы. Показателем качества СС является относительная прочность.

*Первая группа* включает в себя пары материалов, хорошо свариваемых между собой УЗС: полистирол — полиметилметакрилат и полиэтилен — полипропилен. У этих материалов совпадают интервалы температур (у первой пары  $T_{в}$ , у второй —  $T_{пл}$ ) и незначительно расходятся показатели вязкости при этих температурах.

*Вторая группа* содержит пары материалов, удовлетворительно свариваемых между собой УЗС: полистирол — поликарбонат, полиметилметакрилат — поликарбонат, поликарбонат — полиамид. У них при незначительных отклонениях в значениях показателей вязкости расплавов не совпадают температурные интервалы вязкотекучего состояния.

*Третья группа* включает в свой состав пары материалов, неудовлетворительно свариваемых между собой УЗС, например, полиэтилен — поливинилхлорид. У этих материалов совпадают значения температурных интервалов вязкотекучего состояния, в которых существенно различаются показатели вязкости расплавов. Образование СС происходит в основном за счет диффузионных процессов, но время пребывания при температурах, когда они могут протекать, незначительное.

*Четвертая группа* содержит пары материалов, которые нельзя соединить путем УЗС, например, полиамид — поливинилхлорид. У этих материалов не совпадают оба выбранных критерия подбора.

**Подбор температур нагрева.** Температуру УЗС разнородных ПМ следует подбирать по оптимальным режимам сварки более низкоплавкого из них. В этом случае определяют интервал температур, в котором соединяемые полимеры наиболее активны к реакции объемного взаимодействия между собой. Подбор температуры реакции выполняют для каждой свариваемой пары ПМ так, чтобы скорости реакции были примерно равными.

Для создания в зоне контакта свариваемых пар температурного поля, при котором оба материала могли бы вступить в процессы объемного взаимодействия, предложено изменить начальную температуру одного из свариваемых ПМ на величину, компенсирующую различие в температуре перехода в вязкотекучее состояние и скорости прироста температуры [5–7].

Для ПМ, способных обеспечивать плоскую упаковку макромолекулярных образований при их соединении в вязкотекучем состоянии, УЗС с подогревом свариваемых поверхностей является эффективным способом. Нагрев полимеров, имеющих разные температуры плавления, можно проводить нагревателями с регулируемой температурой на каждой из его поверхностей. Глубину проплавления регулируют по времени нагрева ПМ.

**Введение растворителей.** Критерием, обуславливающим получение качественного СС между разнородными пластмассами, служит соотношение вязкости расплавов в температурном интервале вязкотекучего состояния. Если свариваемые ПМ значительно различаются по вязкости расплава, предложено выполнять УЗС с помощью растворителей. В работах, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показано, что такой способ дает хорошие результаты при сварке полистирола с полиамидом, поликарбоната с полиамидом и др. [6–8].

Растворители уже давно применяют для сварки [3, 5]. При сварке с помощью растворителя в полимере снижают на границе контакта межмолекулярное взаимодействие, облегчая диффузию молекул. Этот способ сварки становится возможным, если соединяемый полимер находится в аморфном состоянии, а следовательно, его можно перевести в стадию высокой степени набухания. Также сварка с помощью растворителя реализуема в случае частично кристаллического полимера, содержащего значительный объем аморфной фазы, в которую могут диффундировать молекулы аморфного полимера, находящегося в набухом состоянии и совмещающегося с аморфной фазой кристаллического полимера [6, 7, 9]. Этот способ сварки характеризуется длительным временем выдержки после отключения ультразвуковых колебаний.

**Использование прослоек.** В работе [8] показано, что при УЗС совместимых ПМ следует ис-

пользовать промежуточный слой из сополимеров, содержащих преимущественно неполярные или слабо полярные звенья обоих соединяемых полимеров. При значительном различии свойств применяют несколько слоев прослоек из сополимеров, образующих как бы переходные фазы, обеспечивающие плавное изменение химического строения и свойств полимеров в переходной зоне от одного к другому [8, 13].

При этом звенья, присущие макромолекулам одного из соединений полимеров, постепенно заменяются в сополимерах промежуточных слоев звеньями макромолекул другого полимера. В результате на каждой границе можно обеспечить плотное молекулярное соединение однотипных звеньев и прочность, сравнимую с таковой соединяемых полимеров.

Значительное количество ПМ имеет определенное процентное соотношение однотипных или близких по составу звеньев, которые при сварке могут образовывать прочное СС. Поэтому условием образования качественного СС с применением промежуточного слоя из набора сополимеров является наличие в зоне контакта молярной доли чужеродных звеньев не более 25 % [6].

Например, для соединения полиэтиленовой пленки с пленками полистирола, поливинилацетата и полипропилена можно использовать прослойки из сополимера этилена с полипропиленом или с винилацетатом при содержании в них молярной доли звеньев этилена не менее 80 %. Также возможен набор пакетов сополимеров этилена с последовательным замещением звеньев этилена звеньями материала, свариваемого с полиэтиленом [4, 12].

**Химическая УЗС.** Такой способ УЗС предусматривает введение в зону сварки полифункционального вещества, способного одновременно вступать в химическую реакцию взаимодействия обоих соединяемых полимеров с макромолекулами. На выбор реагента влияют типы функциональных групп полимеров, которые способны к реакции соединения в процессе сварки.

К необходимым условиям выполнения реакции взаимодействия относятся: правильный выбор присадочного реагента, достаточно активного к функциональным группам свариваемых ПМ; сближение компонентов на расстояние, достаточное для протекания реакции; определение интервала температур, при котором соединяемые полимеры наиболее активны

к реакции взаимодействия с присадочным реагентом [3, 6].

Химическую УЗС предпочтительнее использовать, когда необходимо снизить температурные деформации сварного шва, обеспечить стойкость СС воздействием тепла и растворителей [3, 5, 6].

**УЗС в вакууме.** Для сварки таких ПМ, как поликарбонат с АБС-пластиком, сополимер стирола с полиметилметакрилатом и сополимер тетрафторэтилена с винилиденфторидом, имеющих различные температуру плавления, молекулярную массу, аморфную и частично кристаллическую структуру, можно применять УЗС в вакууме, позволяющую исключить взаимодействие полимеров с внешней средой, приводящее к термоокислительной деструкции и изменению физико-механических свойств свариваемых термопластов [2, 5, 6].

По сравнению со сваркой в атмосфере УЗС в вакууме обеспечивает следующие преимущества:

- отсутствие продуктов термоокислительной деструкции, несмотря на перегрев деталей, имеющих меньшую температуру вязкотекучего состояния или плавления кристаллической фазы;
- значительное снижение вязкости расплава вследствие уменьшения гидростатического

давления; это в свою очередь будет способствовать протеканию процессов рекомбинации и образованию блок- и привитых полимеров в переходной зоне от одного к другому; кроме того, снижение вязкости расплава приведет к лучшему перемешиванию ПМ в зоне соединения за счет увеличения турбулентности течения;

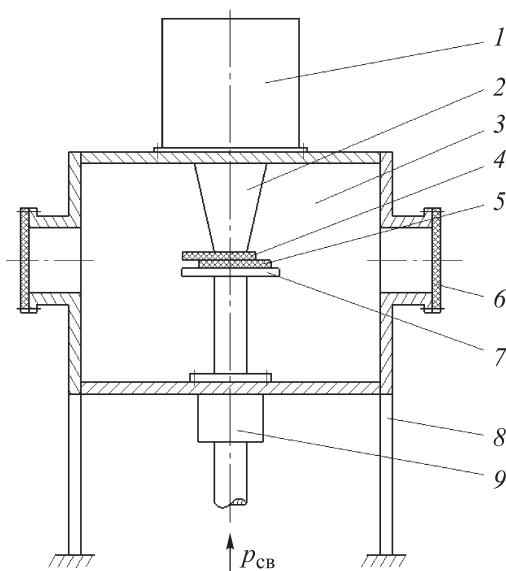
- существенное возрастание коэффициента молекулярной диффузии, сопровождающееся образованием блок-сополимеров и, как следствие, повышение прочности СС и отсутствие изменений физико-механических свойств свариваемых термопластов.

Анализ результатов экспериментов показал, что прочность таких СС зависит от степени разрежения в сварочной камере: при ее увеличении относительная прочность СС растет. При достижении 0,133 Па она составляет 80...90 % прочности основного материала вследствие снижения влияния процессов окисления и термодеструкции. Дальнейшее повышение степени разрежения увеличивает прочность СС еще на 2...4 %, но резко снижает производительность.

Исследования структурных превращений полимеров при УЗС в вакууме показали, что свойства СС не только сохраняются, но и улучшаются. В частности, по результатам изучения молекулярно-массовых характеристик полимеров с применением гелепроникающей хроматографии установлено, что при УЗС в вакууме в поликарбонате и АБС-пластике молекулярно-массовые характеристики не претерпевают значительных изменений. Таким образом, сохраняется исходная структура материала, а молекулярная масса увеличивается — происходит реакция рекомбинации, что способствует улучшению физико-механических свойств разнородных ПМ.

В лаборатории ультразвуковой сварки и резки полимерных материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана спроектирована и изготовлена опытная экспериментальная ультразвуковая установка для сварки разнородных ПМ в вакууме (см. рисунок).

Отличительной особенностью сварки разнородных ПМ на такой установке является сжатие свариваемых деталей с противоположной стороны ввода ультразвуковых колебаний с помощью механизма сжатия, который может быть пневматическим, пружинным или с электроприводом. Предлагаемая схема позволяет варьировать статическое сварочное давление  $p_{св}$



Принципиальная схема ультразвуковой установки для сварки разнородных ПМ в вакууме:

- 1 — магнитострикционный преобразователь;  
2 — волновод; 3 — камера; 4, 5 — свариваемые изделия;  
6 — смотровое окно; 7 — стол-опора; 8 — станина-рама;  
9 — механизм статического сварочного давления

в широких пределах с тем, чтобы изменять создаваемое напряжение.

## Выводы

1. Наиболее значительное влияние на глубину взаимного проникновения (проплавления) материалов при УЗМ разнородных пластмасс оказывает соотношение показателей вязкости расплавов свариваемых ПМ и их свойств.

2. Разработанные технологические приемы позволяют получать качественные СС разнородных пластмасс.

3. Процессы на макроуровне (тепловая диффузия, образование новых химических связей) в значительной степени обусловлены прочностью после сварки разнородных пластмасс, а реологические процессы на макроуровне — прочностью при длительной эксплуатации сварных изделий.

4. При УЗС в вакууме с разрежением в камере 0,133 Па разнородные ПМ не претерпевают структурных изменений, т. е. сохраняется исходная структура полимера, которая обеспечивает прочность СС, равную 80...90 % прочности основного материала.

## Литература

- [1] Крыжановский В.К., ред. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [2] Люшинский А.В. *Диффузионная сварка разнородных материалов*. Москва, Академия, 2006. 208 с.
- [3] Комаров Г.В. *Способы соединений деталей из пластических масс*. Москва, Химия, 2007. 288 с.
- [4] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2015. 288 с.
- [5] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [6] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 15–20.
- [7] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [8] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [9] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>
- [10] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [12] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Weld. Int.*, 2005, no. 19, no. 6, pp. 484–489, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3473>
- [13] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>

## References

- [1] Kryzhanovskiy V.K., ed. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Petersburg, Professiya Publ., 2005. 235 p. (In Russ.).
- [2] Lyushinskiy A.B. *Diffuzionnaya svarka raznorodnykh materialov* [Diffusion welding of dissimilar materials]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 208 p. (In Russ.).
- [3] Komarov G.V. *Sposoby soedineniy detaley iz plasticheskikh mass* [Methods of connecting parts made of plastic masses]. Moscow, Khimiya Publ., 2007. 288 p. (In Russ.).
- [4] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruktsiy* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiya Publ., 2015. 288 p. (In Russ.).

- [5] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding polymeric materials]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [6] Volkov S.S. Ultrasonic butt-seam welding of rigid plastic. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2011, no. 9, pp. 15–20. (In Russ.).
- [7] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Petersburg, Izd-vo Politehnicheskogo univ-ta Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [8] Volkov S.S., Shestel' L.A., Sokolov V.A. Ultrasonic welding of polyamide sealing gaskets using infrared radiation. *Weld. Int.*, 2016, vol. 30, no. 2, pp. 150–154, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1036535>
- [9] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastic. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>
- [10] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Weld. Int.*, 2011, vol. 25, no. 11, pp. 898–902, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581433>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [12] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Weld. Int.*, 2005, no. 19, no. 6, pp. 484–489, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3473>
- [13] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Weld. Int.*, 2003, vol. 17, no. 6, pp. 482–486, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3154>

Статья поступила в редакцию 13.03.2023

## Информация об авторах

**ВОЛКОВ Станислав Степанович** — кандидат технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [map@bmstu.ru](mailto:map@bmstu.ru)).

**ПАНКРАТОВ Александр Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [aspankratov@bmstu.ru](mailto:aspankratov@bmstu.ru)).

**РЕМИЗОВ Андрей Леонидович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [remizoff.andrew@mail.ru](mailto:remizoff.andrew@mail.ru)).

**КОНОВАЛОВ Алексей Викторович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [avk@bmstu.ru](mailto:avk@bmstu.ru)).

## Information about the authors

**VOLKOV Stanislav Stepanovich** — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [map@bmstu.ru](mailto:map@bmstu.ru)).

**PANKRATOV Alexandr Sergeevich** — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [aspankratov@bmstu.ru](mailto:aspankratov@bmstu.ru)).

**REMIZOV Andrey Leonidovich** — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [remizoff.andrew@mail.ru](mailto:remizoff.andrew@mail.ru)).

**KONVALOV Alexey Viktorovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [avk@bmstu.ru](mailto:avk@bmstu.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Панкратов А.С., Ремизов А.Л., Коновалов А.В. Технологические особенности ультразвуковой сварки разнородных пластмасс. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 49–56, doi: [10.18698/0536-1044-2023-5-49-56](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-49-56)

### Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Pankratov A.S., Remizov A.L., Konvalov A.V. Technological features of the heterogeneous plastics ultrasonic welding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 5, pp. 49–56, doi: [10.18698/0536-1044-2023-5-49-56](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-49-56)