

УДК 621.791.16

Влияние разделки кромок на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке

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

МГТУ им. Н.Э. Баумана

The effect of edge cutting on the plastics weldability in the ultrasonic welding

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

Bauman Moscow State Technical University

Систематизированы форма и размеры свариваемых кромок, отвечающих технологическим и эстетическим требованиям. Правильный выбор размеров разделки стыкуемых кромок сварного соединения позволяет не только избежать повреждений материала под волноводом, но и существенно увеличить прочность создаваемого соединения. Рассмотрен кинетический механизм образования соединений с преимущественным внедрением и преимущественным оплавлением при ультразвуковой сварке пластмасс. Показано, что разделка соединяемых кромок при ультразвуковой сварке жестких пластмасс ускоряет рабочий процесс. Установлено, что V-образная разделка свариваемых кромок изделий приводит к повышению концентрации ультразвуковой энергии на стыкуемых поверхностях, а также к преимущественному теплообразованию на границе раздела, вызываемому повышением уровня динамических напряжений, что способствует ускорению ультразвуковой сварки жестких пластмасс. Сварные соединения, полученные по схеме с преимущественным оплавлением, обладают более высокой прочностью, чем образованные по схеме с преимущественным внедрением разделки свариваемых кромок. Разделка кромок повышает прочность соединения, улучшает его внешний вид и сокращает время ультразвуковой сварки.

EDN: MVYNDD, <https://elibrary/mvyndd>

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, разделка кромок, амплитуда колебаний, статическое давление, термические циклы, сварное соединение

The paper systematizes shape and dimensions of the welded edges that satisfy the technological and aesthetic requirements. Correct selection of the cutting dimensions of the welded joint abutting edges makes it possible not only to avoid damage to the material under a waveguide, but also to significantly increase strength of the joint being created. The paper considers kinetic mechanism of the joint formation with the predominant penetration and melting during the plastics ultrasonic welding. It shows that cutting the joining edges during ultrasonic welding of the rigid plastics accelerates the working process. The paper establishes that the V-shaped cutting the product welded edges leads to an increase in the ultrasonic energy concentration on the abutting welded surfaces, as well as to predominant heat generation at the interface caused by an increase in the dynamic stresses level, which contributes to acceleration of the rigid plastics ultrasonic welding. Welded joints obtained by the melting scheme have higher strength characteristics than those obtained with introduction of the welded edges cutting along a joint. Edge cutting increases

strength of the joint being created, improves its appearance and reduces time in the ultrasonic welding.

EDN: MVYNDD, <https://elibrary/mvyndd>

Keywords: ultrasonic welding, edge cutting, oscillation amplitude, static pressure, thermal cycles, welded joint

При ультразвуковой сварке (УЗС) пластмасс иногда невозможно получить сварные соединения (СС) без применения разделки стыкуемых кромок [1, 2]. Так, при УЗС тавровых и стыковых образцов с отсутствием разделки кромок зона максимальной температуры находилась в области, прилегающей к волноводу, и СС не образовывалось. Разделка свариваемых кромок вызывала смещение максимума температуры к границе раздела и гарантировала получение СС.

Неоднократно отмечалось и ускорение процесса УЗС при применении разделки свариваемых кромок [1, 2].

В качестве объекта исследования выбраны образцы из блочного полистирола, который принято относить к легкосвариваемым материалам. Термические циклы, полученные при УЗС образцов из блочного полистирола и иллюстрирующие влияние V-образной разделки кромок (по всей поверхности и ее части) на скорость достижения максимальной температуры T при амплитуде колебаний волновода

$A = 30$ мкм, статическом давлении $p_{ст} = 6,0$ МПа и времени сварки $t = 3$ с приведены на рис. 1. Здесь и далее статическое давление оценивали отношением усилия к сечению неразделанной части образца. Кривые на графиках соответствуют точкам замера температуры.

Видно, что в зоне соединения образцов при отсутствии разделки свариваемых кромок максимальные температуры достигаются за время $t = 1,50$ с, а при наличии разделки кромок по всей поверхности и по ее части — за 0,75 и 0,50 с соответственно (падение температуры при продолжении озвучивания связано с выдавливанием термопар при осадке) [3, 4].

Таким образом, наличие разделки свариваемых кромок даже легкосвариваемых пластмасс сокращает время сварки в 3 раза по сравнению с таковым для образцов без разделанных кромок [1, 3].

Цель работы — исследование зависимости напряжений и характера их распределения в СС от размеров V-образного выступа, взаимо-

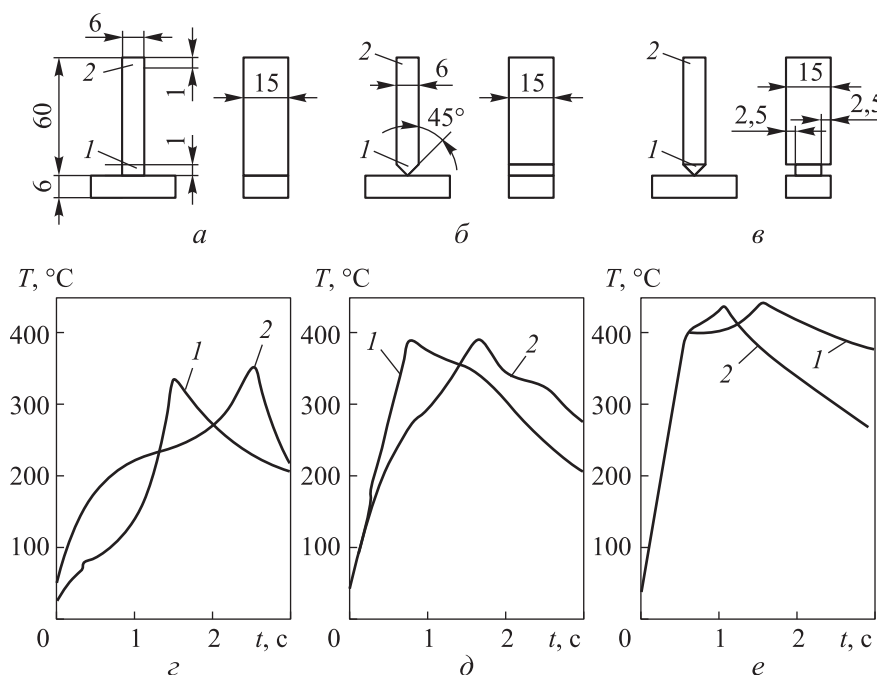


Рис. 1. Схемы соединения (а–в) и термические циклы УЗС (з–е) образцов из блочного полистирола при отсутствии (а, з) и наличии V-образной разделки свариваемых кромок по всей поверхности (б, д) и по ее части (в, е) при амплитуде колебаний волновода $A = 30$ мкм и статическом давлении $p_{ст} = 6,0$ МПа: 1, 2 — точки замера температуры

связи между деформациями материала, прочностью СС и температурой в зоне УЗС.

Кинетический механизм образования СС.

Наличие разделки свариваемых кромок существенно влияет и на кинетический механизм образования СС. В работе [1] отмечено, что образование СС при УЗС изделий с V-образной разделкой кромок, как правило, происходит по двум схемам: с преимущественным внедрением одной из деталей в другую (далее с преимущественным внедрением), если внедрение больше или равно четверти толщины нижней детали, или с преимущественным оплавлением острия разделки (далее с преимущественным оплавлением). Считалось, что образец оплавлен, если внедрение меньше четверти толщины нижней детали [5–7].

Кинетический механизм образования СС с преимущественным внедрением включает в себя три этапа. На первом ($t < 0,1$ с) отсутствуют видимые изменения (рис. 2, а), на втором происходит незначительное расплавление острия раз-

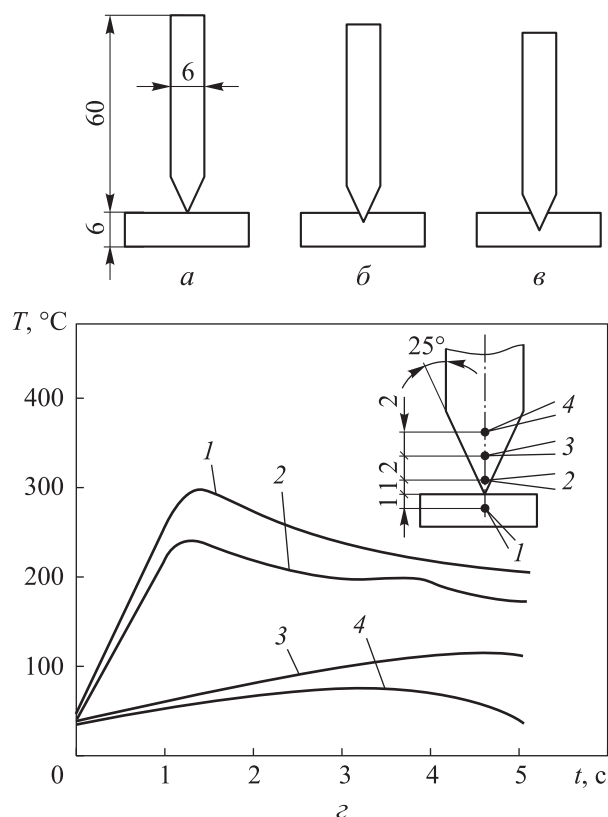


Рис. 2. Схемы образования СС с преимущественным внедрением (а–в) и термические циклы (г) при УЗС образцов из полистирола с амплитудой колебаний $A = 45$ мкм и статическим давлением $p_{ст} = 2,5$ МПа: 1–4 — места расположения термопар

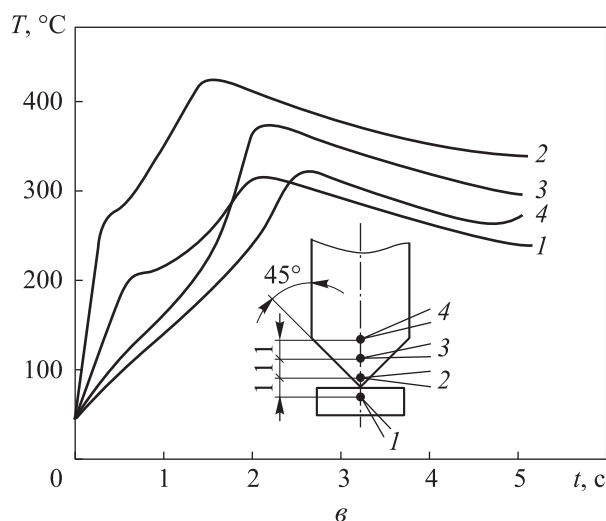
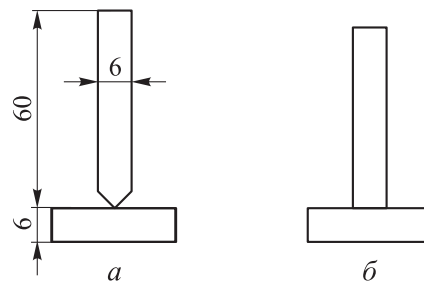


Рис. 3. Схемы образования СС с преимущественным оплавлением (а, б) и термические циклы (в) при УЗС образцов из полистирола с амплитудой колебаний волновода $A = 45$ мкм и статическим давлением $p_{ст} = 9,0$ МПа: 1–4 — места расположения термопар

делки и поверхности нижнего образца, лежащей под острием (рис. 2, б). Острие приобретает округлую форму и незначительно внедряется в полку. Конец этой стадии обычно соответствует схватыванию стенки с полкой. Возникающие при этом температуры примерно одинаковые. На третьем этапе (рис. 2, в) стенка внедряется в полку, причем температура первой примерно на 50°C ниже, чем у второй [2, 4, 7].

Термические циклы при УЗС с преимущественным внедрением показаны на рис. 2, г, где номера кривых соответствуют точкам расположения термопар.

Глубина внедрения в зависимости от режима колеблется в диапазоне $1,5...4,0$ мм. В отдельных случаях внедрение было настолько глубоким, что в полке возникали трещины.

В СС с преимущественным оплавлением (рис. 3) прослеживается тенденция полного или частичного расплавления разделки с минимальным проникновением стенки в полку (обычно до 1 мм). Кинетический механизм образования СС состоит из двух этапов. На первом измене-

ния не наблюдаются (рис. 3, а), время протекания процесса меньше 1 с. На втором этапе начинается расплавление вершины треугольника разделки. Температура острия при этом максимальная [4, 5].

В дальнейшем ($t > 1$ с) происходит разогрев более удаленных от острия участков разделки, что сопровождается образованием грата, равномерно выдавливаемого по обе стороны стенки. При правильно выбранных параметрах разделка расплавляется полностью (рис. 3, б).

В работе [1] протекание процесса УЗС по двум указанным схемам объяснено влиянием сварочных параметров, в частности статического давления, при определенном значении которого может происходить ударное воздействие волновода на торец образца и внедрение последнего.

Термические циклы при УЗС с преимущественным оплавлением показаны на рис. 3, в, где номера кривых соответствуют точкам расположения термодатчиков.

Деформирование разделки при ударе. Рассмотрим условия деформирования разделки при ударе. Приближенная оценка напряжений в контакте деталь — деталь показала, что уровень возникающих напряжений выше предела текучести основного материала [6–8].

Таким образом, есть все основания предполагать, что в выступе уже при статическом давлении происходит пластическая деформация. Это предположение подтверждено и внешним осмотром образцов после воздействия статическим давлением. Следовательно, при озвучивании деформация образца будет происходить преимущественно за счет упругих свойств части детали, имеющей постоянное сечение. Тогда условие отрыва волновода от образца будет иметь вид $\epsilon_{ст} < A$, где $\epsilon_{ст}$ — деформация детали под действием статического давления и амплитуды колебаний волновода A .

Пренебрегая вязкими свойствами материала ввиду того, что время действия динамической силы мало, можно считать, что материал участка постоянного сечения подчиняется закону Гука. Тогда условие отрыва волновода от торца образца приобретает вид

$$\frac{p_{ст} l}{E} < A,$$

где l — длина части образца постоянного сечения; E — модуль упругости.

Статическое давление, при котором происходит отрыв и удар волновода о торец образца,

$$p_{ст} < \frac{AE}{l}. \quad (1)$$

Следовательно, в этом случае должно осуществляться ударное воздействие волновода о торец образца, что приводит к внедрению последнего. Теплообразование целиком связано с потерями на внутреннее трение, приводя к оплавлению V-образной разделки свариваемой кромок (рис. 4).

Для подтверждения ударного воздействия на образец при внедрении и отсутствии последнего при оплавлении фотографировали границы раздела волновод — деталь по методике С.С. Волкова [1]. Границу раздела подсвечивали с обратной по отношению к фотокамере стороны образца [6]. При пропускании коротких (менее 0,1 с) звуковых импульсов через окуляр камеры просматривалась освещенная полоса, ширину которой определяли разностью между амплитудой колебаний и деформацией от статического давления [8–10].

Ограничение времени озвучивания обусловлено тем, что при продолжительном импульсе (более 0,2 с) происходят процессы внедрения или оплавления. Это приводит к выходу линии раздела из фокуса микроскопа, что исключает возможность фотографирования. Съемку проводили на аэрофотопленку повышенной контрастности чувствительностью 1200 ед. Для большей наглядности амплитуду колебаний волновода выбирали значительной (60 мкм) [10–12].

Зависимость зазора между волноводом и торцом образца Δ от статического давления $p_{ст}$ приведена на рис. 5.

Следует отметить, что значение статического давления с достаточной точностью опреде-

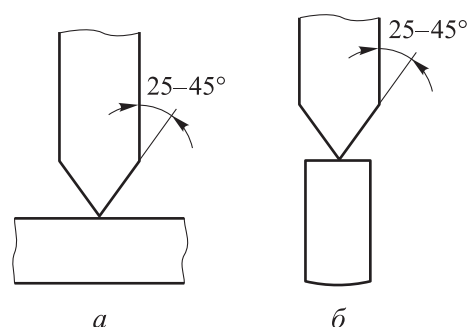


Рис. 4. Схемы профиля V-образной разделки таврового (а) и стыкового (б) соединений

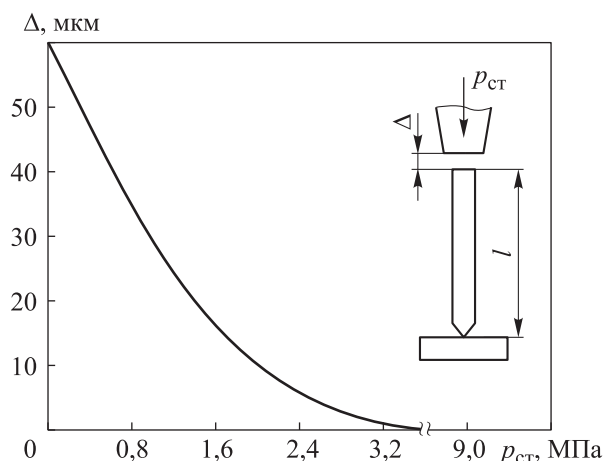


Рис. 5. Зависимость зазора между волноводом и торцом образца Δ из капролона В от статического давления $p_{ст}$

Значения прочности СС, полученные для разных схем УЗС и амплитуд колебаний волновода

Схема УЗС	Прочность СС, МПа, при амплитуде колебаний волновода A , мкм		
	35	40	45
Преимущественное внедрение	5	9	13
Преимущественное оплавление	6	13	19

ляется выражением (1). Увеличение статического давления более 3 МПа переводит процесс в другой, выполняемый по схеме оплавления [12–14].

Анализ термических циклов (см. рис. 2, $г$ и 3, $в$) и прочностных показателей (см. таблицу) СС, полученных по схемам УЗС внедрением и оплавлением, показал, что при внедрении разогрев выступа разделки неравномерный. Температура при внедрении ниже, чем при оплавлении, что, по-видимому, обусловлено периодическими отрывами волновода от образца и, как следствие, меньшим вводом в полимер ультразвуковой энергии [13–15].

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Волков С.С. Технология ультразвуковой сварки многоэлементных изделий из жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2003, № 10, с. 35–39.
- [3] Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва, Научный мир, 2007. 576 с.
- [4] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 646 с.

Как видно из таблицы, прочность СС по схеме УЗС оплавлением выше, чем по схеме УЗС внедрением. Соединения, образованные по схеме с преимущественным оплавлением, должны найти применение при изготовлении изделий, которые в процессе эксплуатации подвержены значительным нагрузкам. Соединения, полученные по схеме с преимущественным внедрением, можно использовать при производстве декоративно-прикладных изделий, так как они характеризуются минимальным гратообразованием [9, 11, 13].

Следует отметить, что образование СС по рассмотренным схемам характерно для большинства жестких термопластов [3, 14, 15].

Исследования проведены на капролоне В, полистироле, полиметилметакрилате и поливинилхлориде. Причем появилась возможность соединять разнородные пластмассы. Сварка материалов с близкими теплофизическими свойствами не представляла трудности. Кроме того, применение схемы с преимущественным внедрением позволило получить СС на несовместимых по теплофизическим свойствам полимерных материалах за счет чисто механического сцепления [9]. При этом должен внедряться образец с большим модулем упругости. Получены следующие СС: капролон В + полистирол, капролон В + полиметилметакрилат и др.

Выводы

1. Установлено, что разделка свариваемых кромок приводит к преимущественному теплообразованию на границе раздела, вызываемому повышением уровня динамических напряжений, что способствует ускорению процесса УЗС.
2. Вследствие равномерного распределения температуры по сварному шву прочность СС, полученных по схеме с преимущественным оплавлением, оказалась больше, чем у СС, созданных по схеме с преимущественным внедрением.

- [5] Волков С.С., Неровный В.М., Малолетков А.В. Технологические особенности ультразвуковой сварки жестких пластмасс в вакууме. *Сварка и диагностика*, 2015, № 6, с. 29–32.
- [6] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Weld. Int.*, 2004, vol. 18, no. 3, pp. 242–245, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2004.3273>
- [7] 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>
- [8] Волков С.С., Бигус Г.А. Технология и оборудование для ультразвуковой контурной сварки изделий из АБС-пластика. *Сварочное производство*, 2016, № 9, с. 51–57.
- [9] Волков С.С. Ультразвуковая стыковая сварка жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2011, № 9, с. 10–14.
- [10] 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>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>
- [12] 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>
- [13] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [14] Алешин Н.П., Чернышов Г.Г. Сварка. *Резка. Контроль*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2004. 624 с.
- [15] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 2, pp. 163–166, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695551>

References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [2] Volkov S.S. Technology of ultrasonic welding of multielement products from rigid plastics. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 10, pp. 35–39. (In Russ.).
- [3] Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2007. 576 p. (In Russ.).
- [4] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Peterburg, Izd-vo Politehnicheskogo un-ta Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [5] Volkov S.S., Neronny V.M., Maloletkov A.V. Technological features of ultrasonic welding of rigid plastics in vacuum. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2015, no. 6, pp. 29–32. (In Russ.).
- [6] Volkov S.S. Technology for ultrasound welding multielement components produced from rigid plastics. *Weld. Int.*, 2004, vol. 18, no. 3, pp. 242–245, doi: <https://doi.org/10.1533/wint.2004.3273>
- [7] 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>
- [8] Volkov S.S., Bigus G.A. Technology and equipment for ultrasonic contour welding of ABS-plastic products. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2016, no. 9, pp. 51–57. (In Russ.).
- [9] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2011, no. 9, pp. 10–14. (In Russ.).
- [10] 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>
- [11] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 1, pp. 63–66, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695155>

- [12] 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>
- [13] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Weld. Int.*, 2012, vol. 26, no. 10, pp. 796–799, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.653164>
- [14] Aleshin N.P., Chernyshov G.G. *Svarka. Rezka. Kontrol.* T. 1 [Welding. Cutting. Control. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 624 p. (In Russ.).
- [15] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Weld. Int.*, 2013, vol. 27, no. 2, pp. 163–166, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.695551>

Статья поступила в редакцию 05.03.2025

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).

СУДАРЕВ Алексей Владимирович — старший преподаватель 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: sudarev@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@yandex.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).

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, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

SUDAREV Alexey Vladimirovich — Senior Lecturer, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sudarev@bmstu.ru).

REMIZOV Andrey Leonidovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: remizoff.andrew@yandex.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, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Сударев А.В., Ремизов А.Л., Коновалов А.В. Влияние разделки кромок на свариваемость пластмасс при ультразвуковой сварке. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 70–76.

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Sudarev A.V., Remizov A.L., Konovalov A.V. The effect of edge cutting on the plastics weldability in the ultrasonic welding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 70–76.