

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-97-104

Ультразвуковая сварка изделий круглой формы из полиамида 610

С.С. Волков, Н.В. Коберник, А.С. Панкратов, Ю.А. Михайлова

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ultrasonic welding of the round-shaped products made of polyamide 610

S.S. Volkov, N.V. Kobernik, A.S. Pankratov, J.A. Mikayilova

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены особенности ультразвуковой сварки изделий круглой формы из полиамида 610. Предложена технология ультразвуковой сварки изделий круглого сечения из полиамида 610, получено качественное герметичное соединение по всему контуру. Описаны физико-механические свойства полиамидов, определяющие их способность к свариванию, а также процессы, протекающие при ультразвуковой сварке. Разработан ультразвуковой сварочный волновод-инструмент круглой формы диаметром, равным таковому свариваемого изделия из титанового сплава. Исследовано влияние технологических режимов сварки на прочность и качество получаемых соединений. Установлено, что при ультразвуковой сварке изделий типа крышки-стакана целесообразно снимать статическое сварочное давление лишь после отключения ультразвуковых колебаний и проводить проковку сварного шва. Рассмотрены опоры-держатели гнездообразной формы, позволяющие выполнять качественную сварку. Для повышения концентрации энергии на стыкуемых поверхностях выбрана V-образная форма разделки кромок, позволяющая получить герметичное сварное соединение максимальной прочности с высокой чистотой поверхности в месте соединения изделий круглой формы из полиамида 610. Показано, что выделение тепла на свариваемых поверхностях происходит за счет внутреннего трения и гистерезисных потерь при циклическом деформировании.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, статическое сварочное давление, амплитуда колебаний волновода, изделие круглой формы, разделка кромок, ультразвуковой сварочный волновод

The paper considers features of ultrasonic welding of the round-shaped products made of polyamide 610. It proposes a technology for ultrasonic welding of the round-shaped products made of polyamide 610; high-quality hermetic connection was obtained along the entire contour. Physical and mechanical properties of the polyamides determining their ability to weld, as well as the processes occurring during the ultrasonic welding, are described. Ultrasonic welding waveguide-tool of the round shape with the diameter equal to diameter of the titanium alloy product being welded was developed. The technological welding conditions influence on the welded points strength and quality was studied. It was established that in ultrasonic welding of products such as a lid-cup, it is advisable to remove the static welding pressure only after turning off the ultrasonic vibrations and forging the weld. Support-holders and nest-shaped forms allowing the high-quality welding were considered. In order to increase energy concentration on the abutting welded surfaces, a V-shaped edge preparation was selected making it possible to obtain a hermetically sealed welded joint with maximum strength and high surface cleanliness in junction of the round-shaped products made

of polyamide 610. It is shown that heat is released on the welded surfaces due to internal friction and hysteresis losses at the cyclic deformation.

Keywords: ultrasonic welding, static welding pressure, waveguide vibration amplitude, round product, edge cutting, ultrasonic welding waveguide

В промышленности широко применяют изделия из полиамида, так как этот конструкционный материал обладает высокой прочностью, износостойкостью и способностью к большим деформациям в широком диапазоне температур [1].

Полиамиды относятся к кристаллизующимся термопластам. Кристаллизация приводит к значительным изменениям плотности, теплопроводности, растворимости, теплоемкости и других физических свойств полиамида [1].

Особенно велико влияние кристаллизации на механические свойства, что проявляется в увеличении модуля упругости, твердости, прочности на разрыв, жесткости и в снижении прочности на удар, разрывного удлинения и эластичности. Именно в своеобразии механических свойств заключается главная особенность кристаллических полимеров [1].

Детали из полиамидов ПА610, ПА6 и ПА12 изготавливают как цельнолитыми, так и из отдельных частей методом литья под давлением, к которым предъявляют высокие эксплуатационные требования.

Изделия, состоящие из отдельных частей, соединяют различными способами: склеиванием, сваркой нагретым инструментом, токами высокой частоты и т. д. Однако эти способы не обеспечивают необходимой производительности процесса, стабильности механических свойств при старении в различных климатических условиях, не позволяют автоматизировать процесс и во многих случаях не отвечают требованиям технической эстетики [2, 3].

Ультразвуковая сварка (УЗС) пластмасс получила широкое применение в промышленности благодаря высоким производительности процесса и качеству сварного соединения (СС), автоматизации и механизации производства [2, 3].

Цель работы — исследование свариваемости полиамида и разработка технологии УЗС изделий круглой формы из полиамида 610.

Ориентировочной оценкой свариваемости полиамида может быть характеристика интенсивности поглощения ультразвуковых (УЗ) колебаний.

Механизм УЗС включает в себя следующие этапы: статическое и вибрационное уплотнение и связанное с ними образование физического контакта; ввод и распространение УЗ-колебаний в свариваемых материалах; преобразование энергии механических колебаний в тепловую энергию и разогрев материалов до температур сварки (термическая активация контактных поверхностей); структурные превращения на молекулярном и надмолекулярном уровнях; объемное развитие взаимодействий; течение материалов в сварной зоне и кристаллизация его на заключительном этапе сварки.

Указанные процессы находятся в тесной взаимосвязи друг с другом и влияют на конечный результат сварки — качество СС, оцениваемое тем или иным критерием (статической, динамической или длительной прочностью; эстетическим внешним видом, стойкостью против воздействия факторов внешней среды и др.) [2, 4].

Преобразование энергии механических колебаний в тепловую энергию при УЗС может осуществляться за счет различных физических процессов (внутреннего и внешнего трения, ударных воздействий) [4]. Известно, что на свариваемость полимерных материалов, в частности полиамидов, при УЗС влияют такие факторы, как гистерезисные потери при циклическом деформировании, динамический модуль упругости и температурный интервал вязкотекучего состояния.

Гистерезисные потери вследствие циклического деформирования являются источником теплоты, что обуславливает возможность получения СС [4–6]. Большая часть пластмасс имеет сравнительно высокие гистерезисные потери, что приводит к их значительному разогреву, гарантируя теплообразование при УЗС. Для получения прочного СС (70...80 % прочности основного материала) поверхности в месте контакта необходимо разогреть до температуры, которая должна быть ниже температуры деформации и соответствовать температурному интервалу вязкотекучего состояния полимера.

Процесс образования физического контакта на свариваемых поверхностях протекает одно-

временно с термической активацией контактных поверхностей. Направленное силовое поле и тепловое движение молекул приводят к необходимому сближению последних. В ходе термической активации повышается подвижность отдельных атомов боковых групп и сегментов молекулярных цепей, и подготавливается третий этап процесса (объемное взаимодействие), который протекает наиболее интенсивно при температуре, равной или несколько большей температуры текучести [4, 6, 7].

Для образования качественного СС полимерных материалов достаточно обеспечить разогрев контактных поверхностей свариваемых деталей до температуры вязкотекучести в случае аморфных полимеров либо до температуры плавления $T_{пл}$ кристаллической фазы в случае частично кристаллических полимеров, таких как полиамид, после достижения которых интенсивно протекают процессы объемного взаимодействия. Последние обусловлены как процессами перемешивания при течении расплава, так и диффузионными процессами на микроуровне [8, 9].

Энергия, выделяемая в полимере вследствие потерь на внутреннее трение и влияющая на процесс теплообразования на поверхности свариваемых изделий, определяется выражением

$$W = \frac{\varepsilon^2 E \omega \eta t}{2},$$

где ε — амплитуда деформации; E — динамический модуль упругости; ω — круговая частота; η — тангенс угла механических потерь; t — время сварки.

Анализ этого выражения позволяет сделать вывод, что уменьшение реальной площади контакта приводит к развитию значительных динамических напряжений, а это в свою очередь увеличивает скорость движения критической температуры. Подобную ситуацию на границе раздела свариваемого изделия можно создать, изменяя геометрическую форму и размеры места сварки, т. е. изменяя его акустическое сопротивление.

Хорошая геометрическая форма и правильная подготовка поверхностей не только облегчают УЗС, но и способствуют повышению прочности сварного шва (СШ) и производительности. Разделка кромок должна иметь форму, позволяющую концентрировать энергию УЗ-колебаний. Форма может быть различной, но чаще всего у одной из стыкуемых дета-

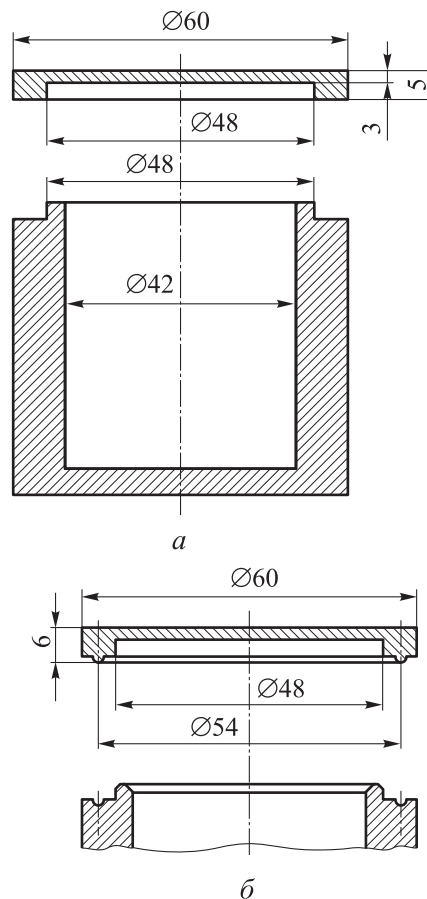


Рис. 1. Схемы изделия круглого сечения: а — стакана и крышки; б — V-образной разделки крышки, стакана и оптимального варианта разделки при сварке стакана с крышкой

лей есть выступ, входящий по всей длине в соответствующий паз другой стыкуемой детали.

При подготовке к УЗС место соединения должно обладать малой первоначальной контактной поверхностью, так как это способствует концентрации энергии, ускоряет процесс расплавления и сварки. Наилучшей является V-образная разделка места СС (рис. 1) [8–10].

Для получения прочного и герметичного СС по всему периметру детали круглого сечения в лаборатории сварки МГТУ им. Н.Э. Баумана проведена работа по выявлению оптимальной формы разделки кромок свариваемых поверхностей изделия и оптимальных режимов УЗС. Установлено, что УЗС нецелесообразно использовать для сварки крышки с корпусом стакана, имеющих резьбовое соединение [2, 3].

Во-первых, резьба является лишней операцией и не улучшает сварку. Во-вторых, при толщине крышки более 6 мм наблюдаются значительные потери энергии УЗ-колебаний. Это приводит к получению некачественного СС,

вследствие чего для сварки следует использовать деталь с высотой крышки не более 5...6 мм [8, 11, 12].

Чтобы организовать максимальное тепловыделение, в зоне сварки создают искусственные концентраторы напряжений, для чего используют предварительную разделку кромок поверхностей соединяемых деталей. Исследованы различные варианты подготовки поверхности под УЗС.

Конструкция разделки кромок сопрягаемых поверхностей является одним из важных факторов, влияющих на процесс формирования СШ. Для достижения повышенной механической прочности СШ его конструкция должна быть следующей: выступ с одной стороны детали и желобок с другой. В этом случае достигается наилучшая текучесть материала, и СШ имеет хороший внешний вид (рис. 1, б).

При сварке с разделкой кромок необходимо предусматривать допуски на текучесть размягченного полимера, который выдавливается из зоны СШ, образуя грат. Если грат нежелателен, то используют специальные конструкции СШ, чтобы избежать выплесков пластмассы. Доведенная до вязкотекучего состояния пластмасса должна соединять две стыкуемые поверхности, заполняя зазор в несколько десятых долей миллиметра.

Большое значение имеет формирование вязкого материала за пределами СШ. Линия наплыва вдоль СШ и выход наплыва за его пределы указывают на то, что сварка произошла.

В тех случаях, когда требуется герметичность изделия, необходимо, чтобы сварные детали имели линию наплыва. Однако линия наплыва ухудшает внешний вид изделия, поэтому ее следует избегать, особенно на полированных поверхностях. Улучшение внешнего вида достигается ступенчатой конструкцией СШ, причем выступ изготавливают так, чтобы наплыв образовался на внутренней стороне изделия (см. рис. 1, б).

Результаты исследования температурного режима УЗС корпусов из полиамида 610 подтвердили, что высота верхней детали свариваемых образцов не должна превышать 5...6 мм вследствие резкого снижения тепловыделения в материале по мере удаления от места ввода УЗ-колебаний.

Также установлено, что при сварке полиамида следует контролировать продолжительность УЗ-импульса, так как перегрев материала

на 318...323 К ведет к почти мгновенной деструкции полимера в зоне сварки, образованию вспененной пористой структуры в СШ [4, 10]. Это в свою очередь может привести к нарушению герметичности СС. При сварке деталей типа крышки-стакана целесообразно снимать статическое сварочное давление лишь после отключения УЗ-колебаний и обязательно использовать проковку.

Таким образом, для получения надежного СС корпусов из полиамида необходимо строго соблюдать параметры режима сварки и использовать специальные технологические приемы [3, 8, 13].

Сварку полиамидных корпусов следует проводить в следующем режиме: амплитуда колебаний волновода-инструмента (далее волновод) $A = 40$ мкм; статическое сварочное давление $p = 0,4$ МПа; время сварки $t_{св} = 2,0...2,5$ с; время проковки $t_{пр} = 0,7...1,2$ с; частота УЗ-колебаний $f = 22$ кГц.

Испытания на прочность всех сварных изделий круглого сечения из полиамида 610 проводили на разрывной машине по схеме одноосного растяжения. Среднее значение разрывного усилия после механических испытаний составляло около 3000 Н. Причем разрушение образцов происходило, как правило, не по СШ, а по основному материалу в околошовной зоне (примерно 80 %). Таким образом, выполненные соединения деталей круглого сечения из полиамида 610 с помощью ультразвука обладают высокими прочностными показателями [2, 8, 13].

Основная трудность при УЗС полиамидных корпусов заключается в получении герметичного СС по всему контуру изделия. Необходимо, чтобы поверхности волновода и свариваемой детали были абсолютно параллельными. При УЗС объемных литевых деталей этого бывает трудно достичь, так как все полимерные изделия при изготовлении имеют допуски на разнотолщинность. Детали не всегда имеют одинаковую толщину по длине окружности, что оказывает значительное влияние на образование надежного СС. В этом случае даже использование специальных опор (что усложняет технологию процесса сварки) не всегда позволяет получить герметичное соединение.

Таким образом, одной из причин негерметичности СС является различный контакт между рабочим торцом волновода и поверхностью свариваемого изделия по его контуру [10, 12, 14].

Отклонение от оптимальных режимов сварки также может влиять на качество СС. Перегрев полиамида сопровождается изменением его структуры. В качестве причины нарушения герметичности СС может выступать и вспененная пористая структура материала [3, 4, 11].

При сварке изделий симметричной формы, таких как цилиндры и конические изделия, точка приложения волновода должна совпадать с центром симметрии этого изделия. Если в точке приложения волновода свариваемая поверхность слишком тонка и проминается под давлением, то УЗ-колебания не будут передаваться через эту поверхность к границе раздела свариваемых кромок. В таких случаях рекомендуется использовать круглый волновод в зависимости от формы изделия.

Для УЗС изделий круглой формы из полиамида рассчитаны и изготовлены круглые волноводы диаметром, равным таковому свариваемого изделия (60 мм), из алюминия, стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ4 (рис. 2) [15].

Установлено, что для УЗС полиамида 610 целесообразно применять волновод из титанового сплава ВТ4, так как в этом случае время УЗС сокращается на 30...40 % по сравнению со сваркой стальным и алюминиевым волноводами.

При УЗС изделий из полиамида круглой формы на образование СС большое влияние

оказывает удерживающее приспособление — опора. Если изделие плохо закреплено, то сварка происходит неравномерно и сопровождается значительной деформацией соединяемых поверхностей.

В зависимости от формы изделия для фиксации свариваемых заготовок можно применять различные удерживающие приспособления — опоры. Использование опор-держателей преследует три цели: предотвратить смещение одной части изделия относительно другой, избежать смещения изделия в процессе УЗС относительно волновода и предотвратить контакт соединяемых заготовок с руками сварщика-оператора [15].

Некоторые конструкции опор-держателей позволяют создать давление на свариваемые заготовки, что может повысить качество СС. Конструкция опор-держателей зависит от формы и типа изделия, подлежащего сварке, и частично от материала, из которого изготовлено изделие. Самой распространенной является гнездообразная опора. Ее гнезда должны точно соответствовать нижней части изделия, укладываемого в опору.

Экспериментальные исследования опор из стали и текстолита проводили в гнездообразной опоре из текстолита, где с торцов присутствовали упоры. Это позволяло не только сваривать детали без смещения, но и выдерживать размер нахлестки одной детали на другую [14].

Испытания СС на герметичность выполняли с применением воздуха, подаваемого в корпус стакана. Давление, при котором происходило разрушение, фиксировали по манометру, установленному на трубопроводе в непосредственной близости от испытуемого изделия. Воздух подавали в корпус через редуктор, обеспечивающий на его выходе давление 3,5 МПа. Стакан с воздушным трубопроводом соединяли штуцером, который был впаян в стакан. Воздух непрерывно поступал внутрь стакана до его разрушения.

Анализ результатов испытаний показал, что СС разрушается при давлении 2,5...3,0 МПа. Чтобы получить высокую прочность СС, следует подобрать оптимальные параметры режимов сварки. При их выборе возникают трудности, связанные с тем, что у полиамидов температура вязкотекучего состояния сравнительно высокая, а его интервал узкий (3...5 °С) [4].

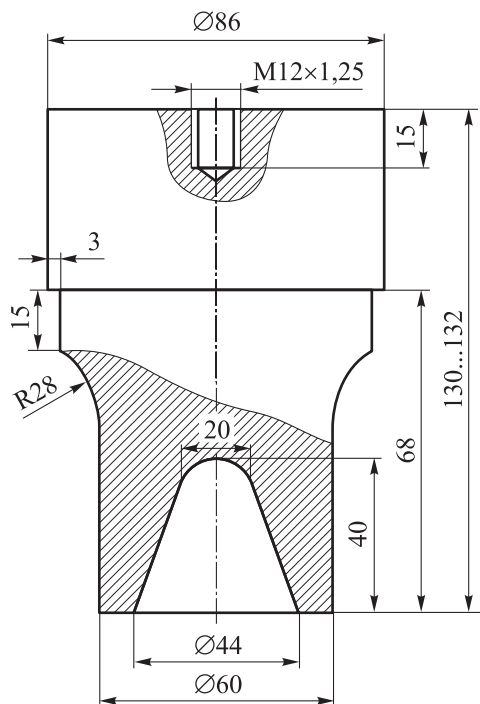


Рис. 2. Схема волновода для сварки круглого изделия из полиамида 610

Если температурный интервал вязкотекучего состояния узок, то незначительное отклонение от оптимальных режимов УЗС, которое неизбежно в реальных условиях, может привести к ухудшению свариваемости. Расширить этот интервал (в 2–3 раза) можно введением некоторых добавок (наполнителей, пластификаторов) в материал.

Выводы

1. При подборе оптимальных параметров режима УЗС, использовании титанового волновода и гнездообразной формы опоры можно получить прочное и герметичное СС на изделиях круглой формы из полиамида 610. При этом необходимо смещать высокотемператур-

ную область к границе раздела, что достигается V-образным выступом на крышке изделия.

2. Установлены оптимальные размеры (форма и высота) соединяемых деталей.

3. Разработана технология УЗС изделий из полиамида типа крышки-цилиндра. Среднее значение прочности СС составило 80 % прочности основного материала.

4. Исследована возможность получения герметичного СС по контуру изделия типа крышки-цилиндра. Показано, что на получение герметичного соединения влияют следующие факторы: параллельность поверхностей волновода и свариваемого изделия, материал и высота опоры, подготовка соединяемых кромок под сварку, форма рабочей части волновода и режимы УЗС.

Литература

- [1] Крыжановский В.К., ред. *Технические свойства полимерных материалов*. Санкт-Петербург, Профессия, 2005. 235 с.
- [2] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [3] Волков С.С. Технология ультразвуковой сварки многоэлементных изделий из жестких пластмасс. *Сварочное производство*, 2003, № 10, с. 35–39.
- [4] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [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] Kryzhanovskiy V.K., ed. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. Sankt-Petersburg, Professiya Publ., 2005. 235 p. (In Russ.).
- [2] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 376 p. (In Russ.).
- [3] Volkov S.S. Ultrasonic welding technology for multi-element rigid plastics. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 10, pp. 35–39. (In Russ.).
- [4] Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Petersburg, Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta Publ., 2013. 646 p. (In Russ.).
- [5] Volkov S.S., Nerovnyy V.M., Maloletkov A.V. Technological features of ultrasonic welding of rigid plastics in a 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]. Moscoew, 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 29.04.2023

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: ssv@bmstu.ru).

КОБЕРНИК Николай Владимирович — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: koberniknv@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: ssv@bmstu.ru).

KOBERNIK Nikolay Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Head of 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: koberniknv@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).

PANKRATOV Alexander Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aspankratov@bmstu.ru)

МИКАЙИЛОВА Юлия Александровна — ассистент 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: mikailova@bmstu.ru).

MIKAYILOVA Julyia Alexandrovna — Assistant, 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: mikailova@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Коберник Н.В., Панкратов А.С., Микайилова Ю.А. Ультразвуковая сварка изделий круглой формы из полиамида 610. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 97–104, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-97-104

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Kobernik N.V., Pankratov A.S., Mikayilova J.A. Ultrasonic welding of the round-shaped products made of polyamide 610. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 97–104, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-97-104



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Философия и история образования»

**Авторы: Л.Б. Бахтигулова, Е.Н. Ищенко,
П.Ф. Калашников, И.В. Петухова, К.С. Селянин,
В.Е. Шишов**

Предназначено для освоения дисциплины «Философия и история образования» студентами направления подготовки 44.03.04 «Профессиональное обучение (по отраслям)». Содержание учебного пособия включает такие темы, как предмет и задачи дисциплины, воспитание в первобытном обществе, воспитание и обучение в условиях цивилизаций Древнего Востока, в античном мире, воспитание и школа в Византии, педагогика в Западной Европе в Средние века и в эпоху Возрождения, в Новое и Новейшее время, воспитание у восточных славян, воспитание, обучение и педагогическая мысль в Древней Руси и Русском государстве, в Российской империи, отечественная школа и педагогика советского периода.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>