

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-3-10

Исследование возможности применения ультразвуковой обработки для снижения остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях

С.С. Волков¹, А.В. Коновалов¹, Л.А. Шестель²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Омский государственный технический университет

A Study of the Possibility of Reducing Residual Stresses and Strains in Welded Joints by Ultrasonic Treatment

S.S. Volkov¹, A.V. Konovalov¹, L.A. Shestel²¹ Bauman Moscow State Technical University² Omsk State Technical University

Исследована возможность использования ультразвуковых колебаний для устранения остаточных и собственных напряжений, а также для улучшения качества сварных соединений. По результатам испытаний образцов, выполненных из стали разного класса трех марок, установлено, что ультразвуковая обработка сварных швов способствует полному устранению таких недостатков, как деформации, собственные и остаточные напряжения, а также повышению усталостной прочности и некоторых механических свойств сварных соединений. Проведен анализ методов устранения остаточных и собственных напряжений. Показано, что обработка зоны сварного соединения ультразвуком со временем снижает степень деформирования более чем в 2 раза. Разработана методика определения напряжений в сварных соединениях. Для нахождения энергии и мощности в зоне обработки швов проведена оптимизация режимов ультразвуковой обработки. Выбраны форма и материал волновода-инструмента с ударным механизмом сферической формы.

Ключевые слова: амплитуда ультразвуковых колебаний, остаточные напряжения, сварные соединения, ультразвуковая обработка, сварные конструкции, пластические деформации

This work explores the possibility of using ultrasonic vibrations as a method for eliminating residual and intrinsic stresses, as well as improving the quality of welded joints. Based on the experiments carried out on three steel grades of various classes, it was found that ultrasonic treatment of welds contributed to the elimination of such defects as deformations, intrinsic and residual stresses, as well as increasing fatigue strength and certain mechanical properties of welded joints. An analysis of existing methods of removing residual and intrinsic stresses was conducted. It was shown that the treatment of the welded joint zone by ultrasound reduced the degree of deformation over time by more than two times. A method for

determining stresses in welded joints was developed. Ultrasonic processing modes were optimized to determine the energy and power in the welded zone. The shape and the material of the waveguide tool with a spherical percussion mechanism were selected.

Keywords: amplitude of ultrasonic vibrations, residual stresses, welded joints, ultrasonic treatment, welded structures, plastic deformations

Известно, что сварные конструкции вследствие неравномерного нагрева или охлаждения сварных соединений (СС) содержат остаточные напряжения (ОН), достигающие предела текучести, и изменяют свою форму: укорачиваются, изгибаются, скручиваются, теряют устойчивую форму равновесия. С помощью различных технологических приемов удается несколько улучшить поля ОН, обращая их из опасных для прочности в безопасные. Однако уменьшение ОН, вызванных сваркой, по-прежнему остается актуальной задачей для технологов [1, 2].

Интересным обстоятельством является то, что деформирование изделий из стали с низкой температурой распада аустенита может продолжаться достаточно долго (несколько дней и даже недель после окончания сварки). При этом изменяются свойства металла и поля ОН, что иногда приводит к образованию в СС так называемых холодных трещин.

Практика изготовления сварных конструкций из разных марок сталей и сплавов показывает, что в зависимости от принятой технологии получаемые СС часто имеют иные прочностные характеристики, чем основной металл. Кроме того, образование собственных напряжений изменяет запас пластичности СС, а остаточные деформации, вызванные сваркой, искажают размеры изделий [1]. Перечисленные факторы являются основными специфическими недостатками, свойственными в той или иной мере всем известным процессам сварки [3–5].

Цель работы — разработка технологических процессов ультразвуковой обработки (УЗО) СС для снижения ОН, деформаций и увеличения срока службы изделий.

В основе известных методов уменьшения ОН, деформаций и искажения форм сварных конструкций лежат три основных способа их устранения:

- снижение пластической деформации и вовлекаемого в нее объема металла на стадии его нагрева;
- создание в зонах пластических деформаций, образовавшихся вследствие нагрева, и до-

полнительных деформаций противоположного знака;

- компенсация возникающих деформаций и перемещений путем симметричного расположения сварных швов (СШ), создания дополнительных зон пластических деформаций, предварительного перемещения, обеспечения свободной усадки и др.; это может быть выполнено как при остывании, так и после полного охлаждения изделия [1, 6, 7].

Для уменьшения влияния указанных недостатков на качество сварных конструкций применяют различные технологические приемы в процессе сварки или после нее [1, 2].

Методы снижения напряжений и деформаций в сварных конструкциях. Рассмотрим некоторые из таких методов.

Подогрев при сварке изменяет поля температуры и сварочных деформаций, а в ряде случаев и свойства металла, воздействуя на термический цикл. При этом изменяются напряжения, создаваемые структурными превращениями. В отношении пластических деформаций подогрев, с одной стороны, уменьшает предел текучести, модуль упругости и перепад температур, что способствует снижению максимальных ОН. С другой стороны, он расширяет зону пластических деформаций, если тепловложение при сварке остается прежним.

На рис. 1 приведены схемы, поясняющие процесс снижения ОН местным нагревом. Если создать с двух сторон СС нагретые зоны 1, как показано на рис. 1, а, то металл, расширяясь, вызовет растяжение вдоль СШ и сжатие поперек СШ (рис. 1, б). Такая схема напряжений благоприятна для протекания пластических деформаций вдоль СШ, что необходимо для снятия растягивающих ОН. Перемещая зоны нагрева, как показано стрелкой на рис. 1, а, охлаждая металл позади источника теплоты, процесс можно сделать непрерывным [7, 8].

Если создавать концентрированное охлаждение участка с растягивающими напряжениями, то он будет сокращаться и вызывать суммирование указанных напряжений с ОН. Это

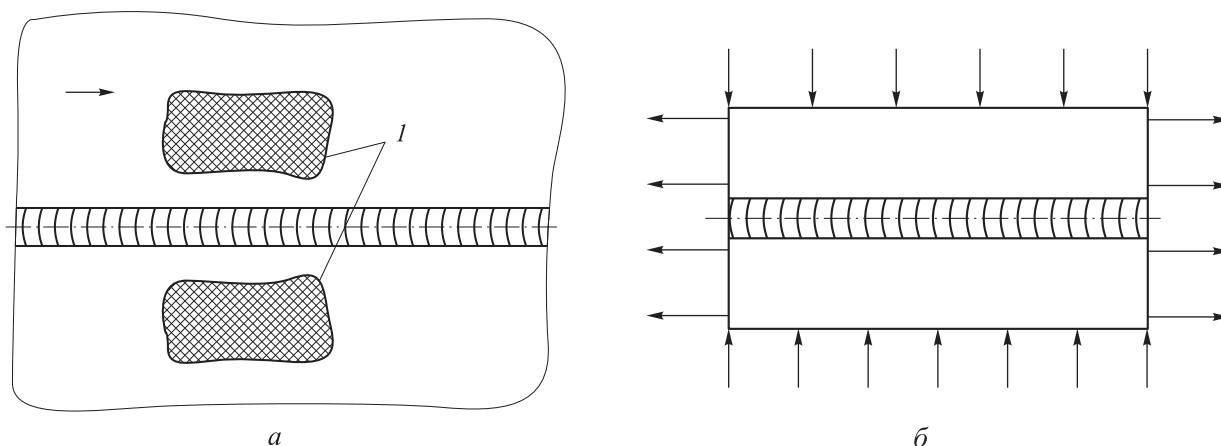


Рис. 1. Схемы нагрева (а) и деформации (б) зоны СШ

вызовет пластическую деформацию и последующее снижение ОН после выравнивания температур [9, 10].

Проковка позволяет осадить металл по толщине, создавая пластические деформации удлинения в плоскости, перпендикулярной направлению удара. Этим достигается уменьшение растягивающих ОН и даже появление сжимающих ОН. Прокровку применяют как в процессе сварки по остывающему металлу, так и после его полного остывания. Эффективность проковки зависит от температуры, количества теплоты, выделяемой при такой обработке, и от значения пластической деформации.

Импульсная обработка взрывом, осуществляемым в специальной камере, создает напряжения в поверхностном слое. Для организации взрыва используют заряды ленточного типа, укладываемые на обрабатываемые поверхности. Этот метод обеспечивает повышение выносливости СС при переменных нагрузках и перераспределение ОН [10].

Прокатка зоны СС предназначена главным образом для уменьшения ОН и заглаживания СШ. В местах прокатки растягивающие напряжения снижаются и могут стать сжимающими [8, 9].

Приложение нагрузок во время сварки позволяет создать в ее зоне растягивающие напряжения, что уменьшает растягивающие ОН и усадочную силу. При проведении нагружения после сварки необходимо, чтобы напряжения от нагрузки складывались с растягивающими ОН и вызывали пластические деформации. После снятия нагрузки напряжения падают [10].

Отпуск сварных конструкций применяют для изменения структуры, свойств металла

и уменьшения ОН. Такой вид обработки целесообразно использовать при повышенных требованиях к прочности сварной конструкции и точности ее размеров, а также при увеличении сопротивляемости хрупким разрушениям [11, 12].

Перечисленные методы обработки усложняют технологию изготовления конструкции и не всегда являются допустимыми, особенно в конструкциях, выполняемых из термически обработанных материалов или материалов, склонных к образованию весьма хрупких структур. Кроме того, отдельные виды обработки не устраняют всех недостатков сварочного процесса.

В связи с этим актуальной задачей сварочной техники становится создание метода местной обработки СС, позволяющего улучшить и стабилизировать структуру, уменьшить деформации, протекающие со временем, и деформации, вызванные сваркой, а также снизить собственные напряжения.

В настоящее время одним из значимых вопросов является применение так называемых чистых технологий, к числу которых относится и экологически безопасная УЗО зон СС [1, 6, 9]. УЗО соединений с целью снятия ОН — это контактный метод непосредственного воздействия на СС. Специфика использования ультразвука для снижения ОН заключается в создании наклепа в зоне СШ, но при существенно меньших статических нагрузках на волновод-инструмент [7, 12].

Однако по сравнению с традиционными методами поверхностного пластического деформирования эффективность наклепа даже не увеличивается. Это дает основание предпола-

гать, что и воздействие ультразвуковых колебаний на ОН в сварных конструкциях может быть результативнее, чем перечисленные способы обработки СС [5, 6, 13].

Экспериментальные исследования по выявлению возможности применения УЗО СС для повышения механических свойств, снижения собственных напряжений, ОН, деформаций и увеличения срока службы изделий. Область использования мощного ультразвука во многом зависит от технических возможностей создания и передачи в обрабатываемую среду колебаний с определенными мощностью и частотой. Основными параметрами, характеризующими процесс передачи энергии ультразвуковых колебаний, являются амплитуда, колебательная скорость, вызывающие их силы и напряжения, а также передаваемая мощность.

Поэтому свойства нагрузки как части колебательной системы определяют косвенным образом по поглощаемой мощности и амплитуде колебательной скорости волновода-инструмента. Ввод энергии ультразвуковых колебаний в обрабатываемый материал осуществляется волноводом-инструментом.

Для обработки свариваемых материалов используют, как правило, волноводы четырех типов: ступенчатые, конические, экспоненциальные и катеноидальные. При обычных режимах обработки СС мощность, рассеиваемая в волноводе-инструменте, мала по сравнению с потерями в преобразователе и мощностью,

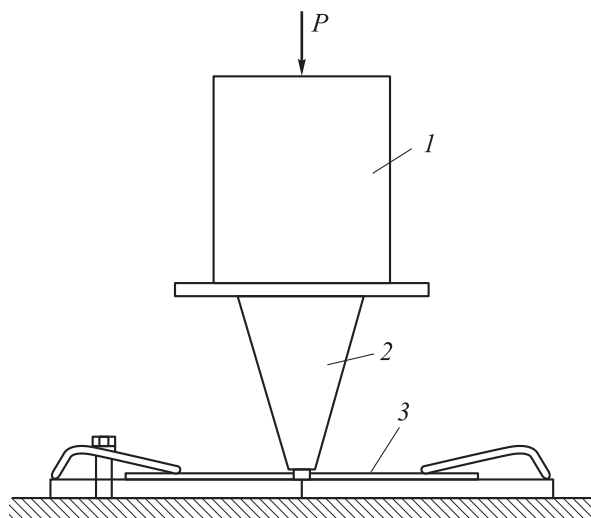


Рис. 2. Обработка СШ ультразвуком:
1 — преобразователь; 2 — волновод; 3 — изделие;
P — усилие прижима рабочего инструмента
к обрабатываемой поверхности

передаваемой в нагрузку. В связи с этим для исследования выбран волновод конической формы [2, 13, 14].

Важнейшим узлом, составляющим основу и заключающим в себе специфику оборудования и технологии УЗО СШ, является электромеханическая колебательная система — магнито-стрикционный преобразователь. Эта система служит для преобразования электрических колебаний ультразвуковой частоты, вырабатываемых ультразвуковым генератором, в механические колебания той же частоты.

С помощью преобразователя обеспечивается необходимая колебательная скорость на рабочем торце волновода-инструмента при максимальном коэффициенте полезного действия на резонансной частоте независимо от изменения сопротивления нагрузки. Обработку СШ можно проводить как вручную, так и на специальной станине-плите. Процесс обработки СШ ультразвуком показан на рис. 2.

Основными параметрами УЗО, влияющими на снижение деформаций и ОН, являются: амплитуда ультразвуковых колебаний рабочего инструмента — наконечника волновода $A = 10...30$ мкм; усилие прижима рабочего инструмента к обрабатываемой поверхности $P = 1...250$ Н; скорость обработки $v = 0,1...200,0$ м/ч; число проходов n вдоль СШ [8].

Колебательная система составлена из резонансных звеньев, число которых кратно числу полувольт. Колебательные свойства упругой однородной среды определяются следующими параметрами: плотностью материала ρ , модулями Юнга E и сдвига G , коэффициентом Пуассона ν , скоростью распространения продольных колебаний упругой волны $c_{пр}$, коэффициентом затухания β и удельным волновым сопротивлением ρc , где c — скорость звука.

В реальных системах распределение колебательных параметров довольно сложное, что объясняется потерями в них, неоднородностью структуры и формы волнопроводов-инструментов, сопротивлением нагрузки, которое может меняться в процессе обработки [5].

При УЗО зоны СС с целью снижения ОН на торцевой части волнопроводов-инструментов устанавливают наконечники сферической формы, выполненные из твердого сплава ВК-8, что позволяет обрабатывать СШ во всех пространственных положениях и труднодоступных местах, а также на сферических поверхностях — трубах, резервуарах, шарах и т. д. [9, 10].

Для проведения исследования по обработке СС ультразвуком использована установка ИЛ100-16 «Технологический комплекс «Шмель» (рис. 3), разработанная и серийно выпускаемая фирмой «Ультразвуковая техника ИНЛАБ». Установка ИЛ100-16 предназначена для упрочняющей обработки СС металлоконструкций, эксплуатируемых при переменных нагрузках, методом ударного деформирования на ультразвуковой частоте. УЗО, оказывающая комплексное воздействие на сварной шов, обеспечивает:

- снижение концентрации напряжений нагрузки в СС;
- создание на обрабатываемой поверхности упрочняющего слоя с повышенной сопротивляемостью к образованию трещин;
- выгодное перераспределение сварочных ОН в СШ и околошовной зоне;
- увеличение циклической долговечности СС до уровня основного металла.

Установка ИЛ100-16 состоит из магнито-стрикционного преобразователя и ударного волновода-инструмента мощностью 1,5 кВт, выполненного из титанового сплава ВТ-5. Рабочий торец волновода-инструмента с накопником сферической формы из твердосплавного материала позволяет повысить срок его службы.

В качестве источника питания магнито-стрикционного преобразователя использован модернизированный серийно выпускаемый фирмой «Ультразвуковая техника ИНЛАБ» ультразвуковой генератор ИЛ10-1,5 с расширенным диапазоном частот 20...70 кГц, массой 12 кг и габаритными размерами 310×310×160 мм. Генератор оснащен плавной регулировкой мощности до 1,5 кВт, цифровым частотомером, аналоговым индикатором резонанса акустической системы, фазовой автоподстройкой частоты колебаний и источником поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение генератора — воздушное, принудительное. Выходная частота может меняться в любую сторону.

В процессе работы установки ИЛ100-16 частоту ультразвуковых колебаний контролировали с помощью цифрового частотомера, вмонтированного в генератор ИЛ10-1,5. Для измерения амплитуды колебаний волноводо-инструментов использовали датчики, разработанные на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Пульт управления, оборудованный системой защиты,



Рис. 3. Фрагмент обработки вертикальной сварной конструкции с помощью установки ИЛ100-16

не позволяет начинать работу при перегреве или недостаточном давлении в системе.

Ультразвуковая колебательная система оснащена автономной системой принудительного жидкостного охлаждения, удобной в эксплуатации. Соединительный шланг длиной 10 м дает возможность проводить работы в труднодоступных местах и обрабатывать вертикальные СС. Установку ИЛ100-16 можно применять как в цеховых, так и в полевых условиях. На рис. 3 показан фрагмент обработки вертикальной сварной конструкции с помощью установки ИЛ100-16.

УЗО поверхности СШ большой протяженности проводят волноводом-инструментом, установленным перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, перемещая его возвратно-поступательными движениями (рис. 4). Для получения оптимального результата ширина зоны упрочнения должна быть не менее 25...30 мм от линии сплавления в каждую сторону от СШ. УЗО можно рекомендовать для ответственных сварных конструкций, эксплуатируемых в условиях повышенной коррозии и вибрации, при циклических нагрузках [1, 6, 11].

В качестве образцов применяли пластины толщиной 3 мм размером 250×80 мм, изготовленные из сталей разного класса: перлитной Ст3, аустенитной 1Х18Н9Т и мартенситной 20ХГСНА. Выполняли как сварку встык соответствующими электродами, так и оплавление кромки неплавящимся электродом в защитной среде из аргона. В процессе воздействия ультразвука нагрев образца не происходил.

УЗО СС проводили по трем схемам: обрабатывали шов, околошовную зону и всю об-

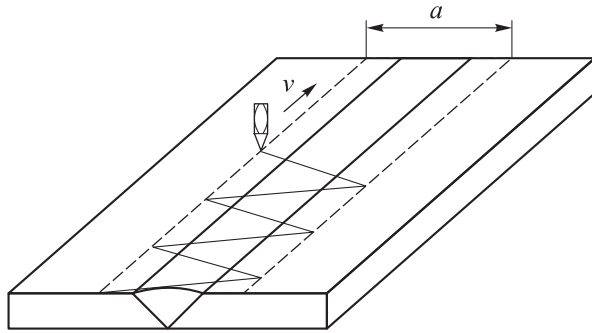


Рис. 4. Схема расположения зоны УЗО стыкового СС:
a — ширина зоны УЗО

ласть СС (шов и околошовную зону). В ряде случаев СШ снимали заподлицо с основным металлом (см. рис. 4).

В работах [7, 8, 11] показано, что большинство СС из низколегированных сталей деформируется при комнатной температуре вследствие распада остаточного аустенита. Этот распад можно ускорить, например, проковкой или обработкой холодом либо стабилизировать структуру низким отпуском образцов после сварки. Однако эти виды обработки для большинства специальных сталей (спецсталей) рекомендовать нельзя.

В целях уменьшения деформирования изделий из спецсталей опробовано воздействие ультразвука на зону СС, способное вызвать ускорение структурных превращений неустойчивого аустенита. Эксперименты проводили на кольцевых образцах из стали 20ХГСНА толщиной 3,2 мм, деформирующихся после оплавления внешних кромок. После оплавления кромки часть образцов подвергали воздействию УЗО в основном по околошовной зоне с обеих сторон кольца. Ширина зоны обработки составляла 8...12 мм.

Анализ результатов экспериментов показал, что обработка зоны СС ультразвуком со временем уменьшает степень деформирования более чем в 2 раза. Причиной снижения деформирования после УЗО, по-видимому, является ускорение протекания структурных превращений в процессе обработки. При этом не требуются такие значительные давления, как при проковке, которые приводят к резкой нагартовке металла и образованию трещин в СС спецсталей.

Исследования влияния УЗО на снижение ОН и деформаций прогиба, вызванных сваркой, проводили на пластинах толщиной 3 мм

при оплавлении кромок. Использовали образцы из сталей 1Х18Н9Т, Ст3 и 20ХГСНА. В ходе эксперимента измеряли начальный прогиб пластины в ее плоскости.

Установили, что в сварных образцах из сталей Ст3 и 20ХГСНА обработка СШ ультразвуком снижает ОН примерно в 2 раза, а в пластинах из стали 1Х18Н9Т — на 15...20 %. Опыты показали, что повторные УЗО швов на первых двух сталях не дают ожидаемого эффекта, тогда как на стали 1Х18Н9Т каждая последующая обработка СШ ультразвуком давала некоторое снижение напряжений. Так, после третьей УЗО общие напряжения упали примерно на 30 %.

Эти опыты позволяют предположить, что при отработке технологии воздействия ультразвука на СШ можно будет свести ОН к минимуму. Уменьшение ОН и деформаций, по-видимому, вызвано перераспределением напряжений вследствие ультразвуковых колебаний как силового фактора, вызывающего пластические деформации.

В работах [1, 3, 7, 9] показано, что ОН в сталях, склонных к деформированию, не остаются постоянными, а в некоторых марках увеличиваются со временем, что преимущественно связано с распадом остаточного аустенита. Нарастание напряжений может привести к образованию холодных трещин в сварных конструкциях.

Выводы

1. Установлено, что УЗО СШ способствует полному устранению собственных напряжений, ОН и деформаций, а также повышению усталостной прочности, механических свойств СС и, соответственно, долговечности изделий в среднем в 1,5 раза.

2. Проведен анализ методов устранения ОН, собственных сварочных напряжений и деформаций.

3. Выявлено, что на перераспределение ОН влияют основные параметры процесса УЗО — амплитуда ультразвуковых колебаний и усилие прижима рабочего инструмента к обрабатываемой поверхности.

4. Определена геометрическая конфигурация контактирующего наконечника волновода-инструмента. Показано, что наиболее эффективной является сферическая форма наконечника.

Литература

- [1] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И., Малов И.Е., Михайлов В.С., Коломеец Н.П. Разработка технологии и нового оборудования для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений. *Сварочное производство*, 2015, № 9, с. 38–42.
- [2] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [3] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of nonwoven materials. *Welding International*, 2005, vol. 19(6), pp. 484–489, doi: 10.1533/wint.2005.3473
- [4] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding International*, 2003, vol. 17(6), pp. 482–486, doi: 10.1533/wint.2003.3154
- [5] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding International*, 2003, vol. 27(3), pp. 163–166, doi: 10.1080/09507116.2012.695551
- [6] Палаев А.Г., Попов А.И., Максаров В.В. Технология, оборудование ультразвуковой упрочняюще-финишной обработки металлов и контроль качества. *Металлообработка*, 2011, № 6(66), с. 38–41.
- [7] Палаев А.Г., Махов В.Е., Потапов А.И. Автоматизация контроля качества сварных швов с использованием ультразвуковой технологии. *Известия вузов. Приборостроение*, 2009, № 5, с. 75–81.
- [8] Кимстач А.В., Тарасов А.С., Шурпицкий А.В. Многофункциональная установка снятия сварочных остаточных напряжений. *Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб.*, Санкт-Петербург, СЗТУ, 2002, вып. 26, с. 77–80.
- [9] Кимстач А.В. *Методы контроля и диагностика остаточных напряжений в сварных соединениях, обработанных ультразвуком*. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, СЗТУ, 2004. 163 с.
- [10] Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рябинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. *Волны в сплошных средах*. Москва, Физматлит, 2004. 472 с.
- [11] Маслов Б.Г., Выборнов А.П. *Производство сварных конструкций*. Москва, Академия, 2015. 288 с.
- [12] Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
- [13] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799, doi: 10.1080/09507116.2011.653164
- [14] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2013, vol. 27(3), pp. 63–66, doi: 10.1080/09507116.2012.695155

References

- [1] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I., Malov I.E., Mikhaylov V.S., Kolomeets N.P. Development of technology and new equipment for ultrasonic impact treatment of welded joints. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2015, no. 9, pp. 38–42 (in Russ.).
- [2] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiya publ., 2001. 376 p.
- [3] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of non-woven materials. *Welding International*, 2005, vol. 19(6), pp. 484–489, doi: 10.1533/wint.2005.3473
- [4] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between the edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding International*, 2003, vol. 17(6), pp. 482–486, doi: 10.1533/wint.2003.3154
- [5] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding International*, 2003, vol. 27(3), pp. 163–166, doi: 10.1080/09507116.2012.695551
- [6] Palaev A.G., Popov A.I., Maksarov V.V. Technology, equipment for ultrasonic strengthening finishing metal treatment and quality control. *Metalloobrabotka*, 2011, no. 6(66), pp. 38–41 (in Russ.).
- [7] Palaev A.G., Makhov V.E., Potapov A.I. Automation of welded seams quality assurance with the use of ultrasonic technology. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 5, pp. 75–81 (in Russ.).

- [8] Kimstach A.V., Tarasov A.S., Shurpitskiy A.V. Multifunctional installation of welding residual stress removal. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya. Mezhhvuz. sb.* [Problems of engineering and engineering. Interuniversity collection]. Sankt-Petersburg, SZTU publ., 2002, iss. 26, pp. 77–80 (in Russ.).
- [9] Kimstach A.V. *Metody kontrolya i diagnostika ostatochnykh napryazheniy v svarnykh soedineniyakh, obrabotannykh ul'trazvukom.* Kand. Diss. [Methods of monitoring and diagnostics of residual stresses in ultrasonic-welded joints. Cand. Diss.]. Sankt-Petersburg, 2004. 163 p.
- [10] Gorshkov A.G., Medvedskiy A.L., Ryabinskiy L.N., Tarlakovskiy D.V. *Volny v sploshnykh sredakh* [Waves in continuous media]. Moscow, Fizmatlit publ., 2004. 472 p.
- [11] Maslov B.G., Vybornov A.P. *Proizvodstvo svarnykh konstruksiy* [Production of welded structures]. Moscow, Akademiya publ., 2015. 288 p.
- [12] Makarov Eh.L., Yakushin B.F. *Teoriya svarivaemosti staley i splavov* [Theory of weldability of steels and alloys]. Moscow, Bauman Press, 2014. 487 p.
- [13] Volkov S.S. Ultrasound welding of brush elements. *Welding International*, 2012, vol. 26(10), pp. 796–799, doi: 10.1080/09507116.2011.653164
- [14] Volkov S.S. Ultrasonic butt welding of rigid plastics. *Welding International*, 2013, vol. 27(3), pp. 63–66, doi: 10.1080/09507116.2012.695155

Статья поступила в редакцию 15.04.2019

Информация об авторах

ВОЛКОВ Станислав Степанович — 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: avk@bmstu.ru).

КОНОВАЛОВ Алексей Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

ШЕСТЕЛЬ Леонид Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр-т Мира, д. 11, e-mail: weldtech@mail.ru).

Information about the authors

VOLKOV Stanislav Stepanovich — Candidate of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

KONOVALOV Aleksei Viktorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: avk@bmstu.ru).

SHESTEL Leonid Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: weldtech@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Коновалов А.В., Шестель Л.А. Исследование возможности применения ультразвуковой обработки для снижения остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 2, с. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-3-10

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Konovalov A.V., Shestel L.A. A Study of the Possibility of Reducing Residual Stresses and Strains in Welded Joints by Ultrasonic Treatment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 2, pp. 3–10, doi: 10.18698/0536-1044-2020-2-3-10