

УДК 624.21.014.2, 621.791

*МУЗАЛЕВ ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ, доцент,  
vnm@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

*СЕМУХИН БОРИС СЕМЕНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
bss@ispms.tsc.ru*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ**

В работе рассмотрены вопросы разработки и применения новой методики сварки больших стальных плит мостовых переходов. Приведена технологическая процедура такой методики в применении к штатным мостам. Установлено, что использование стеклянной подложки существенно не влияет на физико-механические свойства как самих сварных швов, так и металла вблизи них. Доказана надежность и целесообразность применения такой методики на реально возведенном мостовом переходе через р. Чулым. Делается вывод о научной составляющей методики, которая заключается в том, что экспериментально доказывается процесс уравнивания остаточных напряжений в зоне термического влияния в ходе выполнения сварочных работ.

**Ключевые слова:** сварка; стальные мосты; стеклянная подложка; методика; остаточные напряжения.

*VASILII N. MUZALEV, PhD,  
vnm@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

*BORIS S. SEMUKHIN, Dsc, Professor,  
Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia*

## **WELDING OF METAL BRIDGE SPANS**

The paper deals with the development and application of a new technique of welding large steel plates of bridges. The technological procedure of this technique as applied to regular bridges. It is found that the use of a glass substrate does not significantly affect mechanical properties of both welds and metal near them. The reliability and usefulness of this technique is proved on the real bridge erected over the river Chulyum. The process of balancing the residual stresses in the thermal effect zone is experimentally proved during welding work.

**Keywords:** welding; steel bridges; glass substrate; methodology; residual stresses.

Большинство особо ответственных стальных конструкций и сооружений все еще обладают целым набором неразъемных соединений, получающихся методом сварки. В частности, это все большие автодорожные и желез-

нодорожные мосты. Поэтому «монтажная сварка конструкций автомобильно-дорожных, городских, совмещенных и пешеходных мостов (включая путепроводы, виадуки, эстакады), сооружаемых в любых климатических зонах», имеет широкое применение в Российской Федерации (СТП 005–97. Технология монтажной сварки стальных конструкций мостов). Сварка на медной и флюсо-медной подкладке является также весьма распространенным способом сварки.

Однако использование дорогостоящей меди при сварке больших по протяженности стальных конструкций зачастую нерационально. Поэтому возможность замены медной подложки на простую и дешевую являлась актуальной задачей. Кроме того, быстрое отведение тепла при использовании медной подложки не всегда оправданно в строительстве при экстремально низких температурах Сибири. Сама идея использования стеклянной подложки также весьма интересна с научной точки зрения, т. к. напряженно-деформированное состояние стыковых соединений вблизи и вдали от шва в значительной мере определяется тепломассопереносом и задача его тестирования и мониторинга актуальна и в научном плане.

Наибольшую опасность для нормальной работы неразъемных соединений при сварке создают напряжения. Сварочные деформации возникают от неравномерного нагрева изделия в процессе сварки и частично остаются в нем в результате усадки при остывании сварного шва и разогретого основного металла. При этом необоснованное использование подложек может привести к неоднородным распределениям напряжений и ухудшению работы конструкции. В связи с этим многими исследователями предлагаются самые различные способы и методы фиксирования как локальных, так и объемных напряжений вблизи и вдали от места сварки.

Исследования зарубежных ученых [1] показывают, что значительные растягивающие напряжения (~ 90 % от предела текучести) распределены вдоль центра шва вблизи верхней поверхности. Измерения остаточных напряжений по сравнению с расчетными на тех же местах с использованием конечно-элементного анализа, включающего в себя передовые в рамках нелинейной модели упрочнения, проведены в работе [2].

Распределение напряжений и их величины определяют разными методами. Например, неразрушающим ультразвуковым методом на основе продольных волн были количественно измерены остаточные напряжения в сварных соединениях. Измерения искажений проводились до и после сварки и для двух режимов – многопроходного и однопроходного. Пик остаточных напряжений и величины угловых искажений были ниже в сварном шве при многопроходной TIG сварке [3].

Очень важным представляется регулирование уровня остаточных напряжений, определяющих свойства сварных соединений. Поэтому для снятия остаточных напряжений в сварных швах используются различные методы. Одним из широко используемых методов является метод прокатки швов роликом. После такой обработки отмечается высокая усталостная прочность швов [4]. Также используются вибрационные методы снятия напряжений [5]. Вибрационное снятие напряжений может быть использовано для замены тер-

мообработки. Термообработка после сварки является традиционным методом снятия этих напряжений, но является дорогостоящим и трудоемким процессом. После вибрационной обработки определялись остаточные напряжения в сварном шве с помощью дифракции рентгеновских лучей, ультразвуковой техники и методов сверления.

Особенно перспективно направление измерения напряжений акустическим методом непосредственно в процессе эксплуатации. Кроме того, необходимо развитие простых, удобных и недорогих методов снятия этих напряжений частично или полностью.

Все эти исследования нашли применение в строительстве мостовых переходов в Томской области. Ведь до середины XX в. в металлических мостах основные соединения элементов проводились с использованием заклепок, т. е. металлоконструкции были клепаными. Последний железнодорожный мост с использованием клепаных соединений был построен в 60-е гг. через р. Чулым в Томской области на железной дороге Асино – Белый Яр. Выполнение клепаных соединений требовало больших затрат, сдерживало темпы строительства. С середины XX в. произошла замена клепаных соединений в мостах на болтовые. Соединения на высокопрочных болтах дало возможность увеличить темпы монтажа пролетных строений и механизировать процессы сборки. В 60-е гг. XX в. в нашей стране активно разрабатывали и внедряли сварку металлоконструкций в промышленности. Учитывая возросший объем строительства автомобильных дорог и также строительство больших мостов, НИИ мостов совместно с Академией им. Е.О. Патона предложили использовать сварку металлических узлов не только на заводах при изготовлении элементов пролетных строений, но и при монтаже. Один из первых мостов с использованием сварных стыков был построен в Киеве – автодорожный мост через р. Днепр.

Применение сварки позволило значительно сэкономить металл на дорогостоящих метизах (болты, гайки, шайбы), уменьшить вес пролетных строений, улучшить стыки на ортотропных плитах проезжей части, более качественно провести устройство дорожной одежды и гидроизоляции. Монтажная сварка стыков вначале применялась в условиях мягкого климата Европы и при положительной температуре наружного воздуха  $t > 0$  °С. Но в 70–80-е гг. XX в. началось строительство внеклассных мостов в Сибири через реки Обь, Енисей и т. д., где необходимо было вести монтаж круглогодично и в зимнее время.

Необходимо было создать сварной равнопрочный стык, который обеспечивал бы надежную работу, с учетом сложной работы стыковых элементов в металлических мостах: динамических нагрузок, работы в температурных режимах от + 60 до – 60 °С, в экстремальных условиях. НИИ мостов совместно с ведущими специалистами Академии сварки им. Патона разработали материалы, оборудование и технологии для возможности ведения работы в экстремальных условиях. Так, при сооружении автодорожного моста через р. Обь в с. Мельниково Томской области удалось отработать ручную, полуавтоматическую и автоматическую сварку на монтаже как в теплое время, так и в зимнее при отрицательных температурах. Именно на этом мосту применили ав-

томатическую сварку с использованием крупки из сварочной проволоки с металлохимической присадкой  $TiO_2$ , что позволило уменьшить количество проходов сварочного автомата. Сварку металла толщиной 12 мм осуществляли за один проход вместо двух, толщиной 16 мм – за два прохода вместо трех-четырех проходов и т. д. Опыт показал, что использование сварки в соединениях пролетных строений значительно ускоряет монтаж пролетных строений и позволяет вывести весь процесс на качественно новый уровень.

При строительстве моста через р. Чулым в районе г. Асино Томской области (рис. 1) проводили сварку мостовых конструкций из стали 15ХСНД и 15ХСНДА.



Рис. 1. Мост через р. Чулым

Толщина свариваемых кромок составляла 12 + 12; 12 + 16 мм. Толщина нижних поясов главных балок составляла 32–40 мм. Были выполнены сварные соединения по сечениям 53–65; 0–2. При автоматической сварке вставок верхних поясов главных балок ортотропных и консольных плит режим для первого прохода составлял:  $I = 740\text{--}780\text{ А}$ ,  $U = 36\text{--}38\text{ В}$ ,  $V = 19\text{ м/ч}$ . Для второго прохода  $I = 530\text{--}560\text{ А}$ ,  $U = 39\text{--}42\text{ В}$ ,  $V = 19\text{ м/ч}$ . Сварку нижних поясов главных балок проводили ручной дуговой сваркой покрытыми электродами по ГОСТ 5264–80\* «Ручная дуговая сварка». Сварку проводили аппаратами ТС-30 на постоянном токе обратной полярности с применением проволоки  $\varnothing 4\text{ мм}$  и крупки  $\varnothing 2\text{ мм}$  марки Св-10 НМА, флюс марки АН-47. Для сварки нижних поясов главных балок из-за варки дефектных мест использовались покрытые электроды марки УОНИ-13/55  $\varnothing 3$  и  $4\text{ мм}$ . Перед сваркой проводили предварительный подогрев свариваемых кромок. Для уменьшения выкрашивания стекла формирующей подкладки и улучшения формирования обратного валика допускалась укладка стеклоткани на стекло. После окончания сварки проводили визуальный и измерительный контроль сварных швов с последующим устранением обнаруженных дефектов и подготовки швов под

ультразвуковой контроль (УЗК). По данным УЗК производили ремонт дефектных мест, после чего осуществлялся вторичный контроль УЗК. При выполнении сборочно-сварочных работ не были допущены отступления от СТП 005–97 и инструкции по сварке.

Стальная балка жесткости пролетного строения мостового перехода через р. Чулым в г. Асино представляет собой неразрезную конструкцию с пролетами по 84 м. В поперечном сечении балка жесткости состоит из двух симметрично расположенных двутавровых балок с консолями, объединенных поверху ортотропной плитой и поперечными связями. Стыки двутавровых балок, листов настила и ортотропных плит проезжей части выполнялись сварными. Роспуски сварных угловых швов в зоне монтажных соединений, предусмотренные проектом для компенсации неточности изготовления и сборки, заваривались при монтаже. Технология выполнения перечисленных монтажных соединений была изложена в инструкции по сварке и СТП-005–97. Технология сборки и сварки обеспечивала получение металлических конструкций пролетного строения заданной формы и размеров с отклонениями в пределах норм, установленных в СНиП III-18–75 «Металлические конструкции», а также с требуемым сочетанием механических свойств (прочность, пластичность, вязкость, хладостойкость и сопротивляемость усталости). Предел текучести и временное сопротивление металла швов были не ниже значения этих характеристик основного металла. Показатели пластичности и вязкости металла шва и зоны термического влияния отвечали требованиям ГОСТ 14019–2003 «Материалы металлические. Метод испытания на изгиб», при этом угол загиба был не меньше 120°. Стальные конструкции пролетного строения моста монтировали в соответствии с чертежами КМД (деталировочные чертежи металлических конструкций), разработанными на основании чертежей КМ, выполненных проектной организацией. Конструкции пролетного строения моста изготовлены из низколегированной хромокремненикелевой стали с медью 15ХСНД и 15ХСНДА. Для автоматической сварки под флюсом стыковых соединений верхних поясов балок, ортотропных и консольных плит пролетного строения применяли сварочную проволоку сплошного сечения марки Св-ЮНМА Ø 2 и 4 мм по ГОСТ 2246–70 «Проволока стальная сварочная. Технические условия». Перед намоткой в кассеты поверхность сварочной проволоки очищали от ржавчины, масла, технологической смазки и других загрязнений механическим путем, пропуская через очистные устройства. Для автоматической сварки монтажных соединений применяли флюс марки АН-47 по ГОСТ 9087–81. Флюс перед сваркой прокалывали в специальных печах при температуре 400–450 °С не менее 2 ч. Прокаленный флюс хранили на подогреваемых поддонах. При ручной сварке нижних поясов главных балок, заварке роспусков, постановке прихваток применяли электроды типа Э50А марки УОНИ 13/55.

Сварочные (технологические) свойства электродов проверяли на соответствие следующим требованиям: а) дуга должна легко зажигаться и стабильно гореть с использованием тока, род и режим которого рекомендованы паспортом на электроды; б) покрытие должно плавиться равномерно, без откалывания кусков покрытия и без образования из него «чехла» или «козырь-

ка», препятствующего непрерывному горению электрода; в) наплавленный на верх пластины валик должен равномерно покрываться шлаком, который после остывания должен легко отделяться; г) металл шва и металл околошовной зоны не должен иметь трещин. Электроды хранили в сухом помещении, а перед использованием подвергали высокотемпературной прокатке (350 °С в течение 2–3 ч). Хранили прокаленные электроды в шкафу при температуре 120 °С. На рабочих местах прокаленные электроды находились в специальных металлических пеналах, исключающих увлажнение и механические повреждения. Укрупнительную сборку плит проводили в целях повышения темпа сборки пролетного строения и выполняли на специальных стендах. Укрупнение плит проводили в следующем порядке: плиты укладывали на выверенные стенды; зачищали свариваемые кромки стыкуемых плит; ставили прихватки и выводные планки; под стык подклеивали стеклянную подкладку; после засыпки крупки, предварительного подогрева свариваемых кромок заваривали корневой шов; после зачистки корневого шва и удаления обнаруженных дефектов (прожог, несплавление, поры) проводили автоматическую сварку второго прохода. Сварку проводили сварочным трактором ТС-30. Зазор между стыкуемыми кромками составлял 8–10 мм. Режим сварки: первый проход:  $I = 740\text{--}780$  А,  $U = 36\text{--}38$  В,  $V = 19$  м/ч; второй проход:  $I = 530\text{--}560$  А,  $U = 39\text{--}42$  В,  $V = 19$  м/ч. После сварки стыка снимали обоймы, укрупненный блок перекаптовывали, проводили осмотр корня шва с удалением визуально обнаруженных дефектов. Удаляли газовой резкой выводные планки и осуществляли механическую обработку и зачистку торцов шва. Шов предоставляли на ультразвуковую диагностику.

Изготовление монтажной секции осуществляли путем последовательной сборки, прирезки и сварки. Сварку монтажных соединений пролетного строения моста проводили по заранее разработанной технологии, устанавливающей последовательность сборочно-сварочных работ, способ сварки, порядок наложения швов и режимы сварки, диаметры и марки электродов и электродной проволоки, требования к другим сварочным материалам. Технология выполнения сварных швов, режимы сварки, а также подготовительные операции при сварке на монтаже остались такими же, как при изготовлении укрупненных блоков. Технологический процесс сварки обеспечивал хорошее качество сварки, требуемые геометрические размеры швов и механические свойства сварных соединений. Соблюдение установленной технологии систематически контролировали. Автоматическую сварку верхних ортотропных плит из стали 15ХСНД и 15ХСНДА выполняли на умеренных режимах (с погонной энергией не более 24 Дж/м). В некоторых случаях рекомендуемые режимы сварки корректировали до 10 % по величине тока и скорости сварки и до 5 % напряжения на дуге. При этом корректировку проводили до начала сварки монтажных соединений на образцах.

Для монтажных соединений, выполняемых ручной дуговой сваркой, применяли электроды УОНИ 13/55. Сварку проводили на постоянном токе обратной полярности. Ручную дуговую сварку покрытыми электродами применяли в следующих случаях: постановки прихваток при сборке стыков под сварку; сварки нижних поясов главных балок; сварки роспусков угловых

швов в зоне монтажных соединений; заварки дефектных мест после удаления обнаруженных дефектов. Стыки нижних поясов главных балок подрезали и собирали с V-образной разделкой с углом раскрытия  $60^\circ$  и зазором не менее 4 мм. После постановки и зачистки прихваток снизу на скобах плотно поджигали стеклянную подкладку. Проводили предварительный подогрев и заварку корневого шва. Сварку проводили на токе электродами  $\varnothing 3$  мм, 80–110 А, электродами  $\varnothing 4$ , 130–160 А. Количество слоев в каждом шве определялось величиной катета шва (для угловых швов) и толщиной свариваемых листов (для стыковых швов) (рис. 2).



Рис. 2. Сварочные работы

Известно [6–9], что прецизионные измерения скорости ультразвука в различных металлах и сплавах позволяют судить о вариациях химического состава, структурных изменениях, однородности строения объекта на микроскопическом уровне, характере распределений внутренних напряжений и пр. Однако зачастую вывести математические зависимости значения скорости акустической волны в материале от конкретных параметров структуры, содержания примесей или уровня напряжений в объекте невозможно. По этой причине устанавливают корреляционные связи между скоростью акустических волн или частотой автоциркуляции ультразвуковых импульсов, пропорционально связанной со скоростью и исследуемым показателем. В качестве средства измерения был выбран прибор, в котором использована автоциркуляционная схема измерения скорости распространения поверхностных (рэлеевских) волн. Эта схема обеспечивает погрешность измерений в пределах  $\pm 0,01\%$ , поэтому позволяет определять изменения скорости акустических волн в металлах и сплавах на уровне десятых долей метра. Измерение напряжений проводили на специально разработанном варианте прибора ASTR по измерению скорости ультразвука методом автоциркуляции импульсов. Отметим, что все измерения проводили непосредственно в процессе нагружения без остановки испытательной машины. Датчик прибора по измерению скорости ультразвука находился в момент испытания в одной из выбранных точек балки пролетного строения. Непрерывно на самописец записывали величину скорости ультразвука и показания (напряжения и деформация) испытательной машины. Такие зависимости были получены как

в случаях чистого растяжения и чистого изгиба, так и при сложном напряженном состоянии.

Анализ работы сложнагруженных мостовых конструкций с применением современных методов акустического контроля позволил провести мониторинг таких объектов, как мосты в процессе эксплуатации, без остановки движения по мостовым переходам. На рис. 3 приведены эпюры нагружения главной балки пролетного строения моста в г. Томске. Видно, что по мере изменения интенсивности движения, а значит, и нагрузки вид эпюры меняется, но значения максимальных напряжений не превышают допустимых. Выбросы напряжений фиксируются вблизи сварных швов.

Далее установлено, что применение медной и стеклянной подложек существенно не меняет вид эпюры нагружений балки мостового перехода в процессе эксплуатации. Более того, величины напряжений в случае использования стеклянной подложки в некоторых случаях не превышают и даже ниже аналогичных при применении медной подложки.

Кроме того, использованная в монтажных условиях при сооружении мостового перехода через р. Чулым в г. Асино новая технология автоматической сварки под флюсом на стеклянной подложке блоков и ортотропных плит из стали марок 15ХСНД и 15 ХСНДА позволила получить: строительный подъем и геометрию пролетного строения заданной формы и размера; механические свойства сварных соединений на уровне основного металла при умеренных режимах и погонной энергии не более 24 Дж/м; уменьшение количества дефектов и времени на их устранение. Научная новизна работы заключается в создании методики сварки больших стальных ортотропных плит в условиях экстремальных температур на стеклянной подложке и внедрении ее в практику.

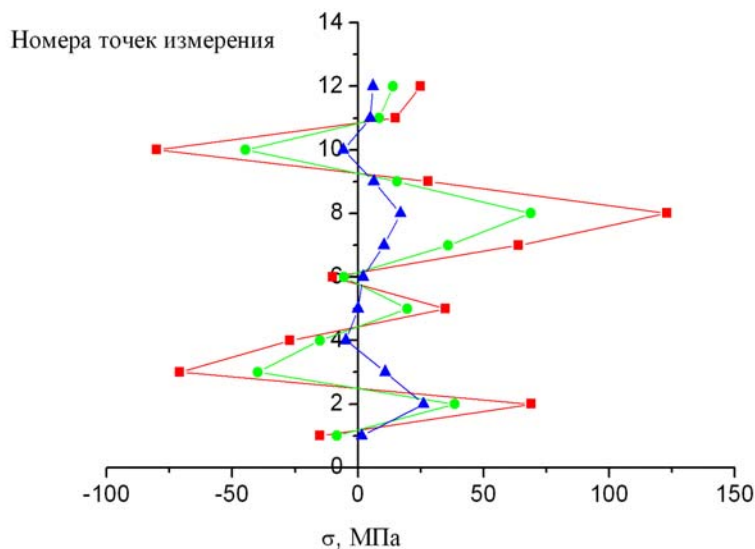


Рис. 3. Эпюры нагружения главной балки (мост через р. Томь). Нагрузка растет: синий – зеленый – красный



### Выводы

1. Применение стеклянной подложки при сварке особо ответственных металлических конструкций мостовых переходов обеспечивает необходимую технологическую прочность сварных швов в экстремальных условиях Сибири.

2. Научная новизна работы заключается в создании оригинальной и новой методики сварки больших стальных ортотропных плит в условиях экстремальных температур на стеклянной подложке и внедрении ее в практику.

3. Использование акустического метода контроля сварных соединений и металла вдали от сварных швов в процессе эксплуатации, т. е. при движении автомашин по мосту, позволяет проводить мониторинг мостовых конструкций *in situ* в реальном времени.

4. Эпюры напряжений, полученные при измерении акустическим методом, хорошо количественно описывают изменения напряжений вблизи и вдали от сварных швов в зависимости от реальной нагрузки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Characterization of microstructure and local deformation in 316NG weld heat-affected zone and stress corrosion cracking in high temperature water* / Lu Zhanpeng, Shoji Tetsuo, Meng Fanjiang, Xue He, Qiu Yubing, Takeda Yoichi, Negishi Koji // *Corrosion Science*. – 53 (2011) 5. – P. 1916–1932.
2. *Measurement and prediction of residual stress in a bead-on-plate weld benchmark specimen* / X. Ficquet, D.J. Smith, C.E. Truman, E.J. Kingston, R.J. Dennis // *International Journal of Pressure Vessels & Piping*. – 86 (2009) 1. – P. 20–30.
3. *Assessment of Residual Stresses and Distortion in Stainless Steel Weld Joints* / P. Vasantharaja, V. Maduarimuthu, M. Vasudevan, P. Palanichamy // *Materials & Manufacturing Processes*. – 27 (2012) 12. – P. 1376–1381.
4. *High pressure rolling of low carbon steel weld seams: Part 2 – Roller geometry and residual stress* / H.E. Coules, P. Colegrove, L.D. Cozzolino, S.W. Wen, J.F. Kelleher // *Science & Technology of Welding & Joining*. – 18 (2013) 1. – P. 84–90.
5. *Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldments and mechanical properties of structural steel joint* / A. Jurcius, A.V. Valiulis, O. Černašėjus, K.J. Kurzydłowski, A. Jaskiewicz, M. Lech-Grega // *Journal of Vibroengineering*. – 12 (2010) 1. – P. 133–141.
6. *Zuev, L.B. Some acoustic properties of a deforming medium Philos* / L.B. Zuev, B.S. Semukhin // *Mag. A*. – 82 (2002) 6. – P. 1183–1193.
7. *Semukhin, B.S. Use of acoustic parameter measurements for evaluating the reliability criteria of machine parts and metalwork* / B.S. Semukhin, L.B. Zuev, A.G. Lunev // *Proceedings of ISMTII-2009*. – 3 (2009). – P. 44–48.
8. *Semukhin, B.S. Determination of Strains near the Welded Seams Engineering* / B.S. Semukhin. – 2 (2010) 12. – P. 950–952.
9. *Zuev, L.B. The use of measurement of velocity of ultrasound to determine the stress-strain state of metal articles* / L.B. Zuev, B.S. Semukhin, A.G. Lunev // *Measurement Techniques*. – 53 (2010) 4. – P. 439–443.

### REFERENCES

1. *Lu Zhanpeng, Shoji Tetsuo, Meng Fanjiang, Xue He, Qiu Yubing, Takeda Yoichi, Negishi Koji. Characterization of microstructure and local deformation in 316NG weld heat-affected zone and stress corrosion cracking in high temperature water. Corrosion Science. 2011. V. 53. No. 5. Pp. 1916–1932.*

2. Ficquet X., Smith D.J., Truman C.E., Kingston E.J., R.J. Dennis Measurement and prediction of residual stress in a bead-on-plate weld benchmark specimen. *Int. J. Pressure Vessels & Piping*. 2009. V. 86. No. 1. Pp. 20–30.
3. Vasantharaja P., Maduarimuthu V., Vasudevan M., Palanichamy P. Assessment of residual stresses and distortion in stainless steel weld joints. *Materials & Manufacturing Processes*. 2012. V. 27. No. 12. Pp. 1376–1381.
4. Coules H.E., Colegrove P., Cozzolino L.D., Wen S.W., Kelleher J.F. High pressure rolling of low carbon steel weld seams: Pt 2. Roller geometry and residual stress. *Science & Technology of Welding & Joining*. 2013. V. 18. No. 1. Pp. 84–90.
5. Jurcius A., Valiulis A.V., Černašėjus O., Kurzydowski K.J., Jaskiewicz A., Lech-Grega M. Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldments and mechanical properties of structural steel joint. *Journal of Vibroengineering*. 2010. V. 12 No. 1. Pp. 133–141.
6. Zuev L.B., Semukhin B.S. Some acoustic properties of a deforming medium. *Philos. Mag. A*. 2002. V. 82. No. 6. Pp. 1183–1193.
7. Semukhin B.S., Zuev L.B., Lunev A.G. Use of acoustic parameter measurements for evaluating the reliability criteria of machine parts and metalwork. *Proc. ISMTII-2009*. 2009. No. 3. P. 44–48.
8. Semukhin B.S. Determination of strains near the welded seams engineering. 2010. V. 2. No. 12. Pp. 950–952.
9. Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. The use of measurement of velocity of ultrasound to determine the stress-strain state of metal articles. *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. No. 4. Pp. 439–443.