

УДК 621.791.75

DOI: 10.18698/0536-1044-2015-12-52-61

Ультраструйная диагностика качества сварных швов*

М.И. Абашин¹, С.В. Бочкарев², А.И. Цаплин², Н.В. Коберник¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Пермь, Пермский край, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29

Ultra-Jet Diagnostics of the Quality of Welds

M.I. Abashin¹, S.V. Bochkarev², A.I. Tsaplin², N.V. Kobernik¹

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Perm Region, Russian Federation, Komsomolsky Prospekt, Bldg. 29



e-mail: abashin@bmstu.ru, bochkarev@msa.pstu.ru, tai@pstu.ru, koberniknv@yandex.ru



Предложен новый метод оценки параметров качества сварных соединений, в частности ударной вязкости разрушения, основанный на воздействии высокоскоростной струей воды на поверхность контролируемого объекта (информативными признаками служат геометрические характеристики образовавшейся гидрокаверны). Представлены некоторые результаты экспериментов, демонстрирующие возможность оценки однородности материала сварного шва при ультразвуковой диагностике. Показана зависимость между глубиной гидрокаверны, образовавшейся при ультразвуковом воздействии, и твердостью, а также ударной вязкостью материала шва. Данные, полученные в результате исследования, свидетельствуют о том, что предложенная технология может занять достойное место среди информационно-диагностических средств, используемых при обслуживании объектов со сварными соединениями.

Ключевые слова: диагностика, ультразвуковое воздействие, сварной шов, твердость, ударная вязкость.



A new method of evaluating quality parameters of welded joints is proposed in the article. In particular, the method deals with impact fracture toughness and is based on the impact that a high speed water jet has on the surface of the controlled object. Geometrical characteristics of the formed hydro cavity serve as informative attributes. The article presents some of the results of the experiments that demonstrate the capabilities of assessing homogeneity of the weld seam using ultra-jet diagnostics. It shows the dependence between the depth of the hydro cavity formed after the ultra-jet impact and the hardness, impact viscosity of the weld material. The data obtained lead to the conclusion that the proposed technology can take its rightful place among the information and diagnostic tools used when maintaining objects with welded joints.

Keywords: diagnosis, ultra-jet impact, weld, hardness, shock viscosity.

Существующие способы сварки, характеризующиеся наличием развитой научно-методической базы и богатого практического опыта, не дают

ответов на вопросы, связанные с контролем качества сварных соединений и обеспечения их надежности. В стандарте ISO 3834-2 [1] указано,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-96004-р_урал_a).

что сварка является особым процессом, результат которого не всегда может быть проверен испытанием после его завершения. Качество сварных соединений должно быть обеспечено в процессе производства.

В современных условиях совершенствование технологии сварки, а также методов диагностики ее качества возможно в рамках создания на основе CALS-технологий единого информационного пространства, объединяющего следующие виды работ [2–4]:

- создание и уточнение с учетом механики разрушения научно-обоснованных норм на размеры дефектов;
- разработка новых, более эффективных, методов неразрушающего контроля (НК) изделий, направленных на выявление поверхностных и подповерхностных дефектов, а также на определение качества термической обработки сварных соединений;
- создание методик оперативного выбора оптимальных технологических режимов сварки.

Нахождение оптимальных режимов для различных методов сварки и повышение качества сварного шва неразрывно связаны с созданием методов контроля, которые позволяли бы гарантировать решение поставленной задачи. В первую очередь это относится к методам НК, для которых сварные конструкции — самый распространенный объект [5].

Общий обзор современных методов и средств НК сварных соединений представлен в работах [6, 7]. Закономерности формирования зеренной структуры показаны в работе [8] на примере сварки трением с перемешиванием.

Качество сварных швов обеспечивается оптимальными технологическими режимами, которые можно прогнозировать методами математического моделирования. В работе [9] представлена модель расчета остаточных напряжений в сварных соединениях, где учтено влияние фазовых переходов при предшествующей термической обработке материалов на макроскопические характеристики среды. Моделирование позволяет также прогнозировать амплитудные значения упругих деформаций в сварном соединении при циклическом нагружении [10].

В работе [11] рассчитана глубина воздействия интенсивной пластической деформации на структуру поверхностных слоев при сварке. В работе [12] представлена методика расчетной оценки показателей свариваемости низколегированной стали с помощью компьютерного мо-

делирования. Эффективность моделирования различных акустических схем контроля проанализирована в работе [13] на примере выявления дефектов, локализованных в наименее благоприятных для их обнаружения условиях (модель наихудшей дефектной ситуации).

Мониторинг качества сварных швов эффективен при использовании рекуррентных нейронных сетей [14], методов вейвлет-преобразований [15, 16], имитационного моделирования, в том числе с применением метода конечных элементов [17, 18].

Качество сварных швов оценивают механическими испытаниями на растяжение [19, 20] и кручение [21]. Механические испытания образцов, вырезанных из дефектных зон кольцевого сварного соединения, эффективны при использовании ультразвукового сканера-дефектоскопа [22].

Эксплуатационная пригодность конструкций в реальном масштабе времени и местоположение дефектов могут быть оценены с помощью акустико-эмиссионного аппаратно-программного комплекса [23]. Акустико-эмиссионная диагностика позволяет выявить структурное состояние сварного соединения и может служить основой метода оценки его прочностных свойств [24]. В сочетании с кинетическим индентированием для оценки степени поврежденности металла сварного соединения акустико-эмиссионную диагностику применяют в условиях эксплуатации при малоцикловой усталости [25] и в процессе сварки [26].

Для обнаружения дефектов сварки, их классификации, оперативной оценки технологического процесса применяют традиционные методы ультразвукового контроля [27–29]. Ультразвуковое воздействие может быть эффективным, если требуется повысить надежность сварных швов [30] и сопротивление сварных соединений усталостному разрушению [31].

Широкографические и спекл-интерферометрические измерительные системы, рассмотренные в работе [32], позволяют оценить напряженно-деформированное состояние и остаточные напряжения сварных конструкций не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации.

Для определения химического состава металла шва применяют методы металлографических исследований структуры сварных соединений и измерения твердости [33].

Несмотря на разнообразие методов контроля сварки, важнейшей задачей остается выявление наиболее опасных зон сварного шва, к которым могут быть отнесены структурно-механические неоднородности, различные дефекты, конструктивные и технологические концентраторы напряжений [34–36].

Поскольку на качество, а следовательно, и на надежность сварных соединений, влияет множество факторов, актуальным остается вопрос разработки метода контроля, который позволял бы интегрально оценить состояние металла сварного соединения.

В настоящей статье предложен новый метод, основанный на процессе гидроразрушения поверхностного слоя материала высокоскоростной струей жидкости — метод ультразвуковой диагностики [37, 38]. Этот метод позволяет создавать имитационные, знакопеременные и нестационарные нагрузки на исследуемое изделие.

Методика проведения исследований. Исследования проводили на сварном соединении пластин из низкоуглеродистой стали Ст3сп по ГОСТ 380–2005 толщиной 10 мм с V-образной разделкой кромок. Угол разделки кромок составлял $(35_{-5})^\circ$, притупление кромок $1,8 \pm 0,8$ мм.

Процесс проводили на подкладной ленте марки ЛМС по ТУ 6-48-00204961-12–90 за один проход автоматической дуговой сваркой под флюсом двумя проволочными электродами. Параметры режима сварки: первая дуга — постоянный ток, обратная полярность, $I_1 = 550$ А, $U_{д1} = 29$ В, угол наклона электрода $\alpha_1 = 90^\circ$; вторая дуга — переменный ток с балансом 75 %, $I_2 = 550$ А, $U_{д2} = 29$ В, угол наклона электрода $\alpha_2 = 65^\circ$ (схема углом вперед). Расстояние между электродами составляло 27 мм, скорость сварки 26 м/ч.

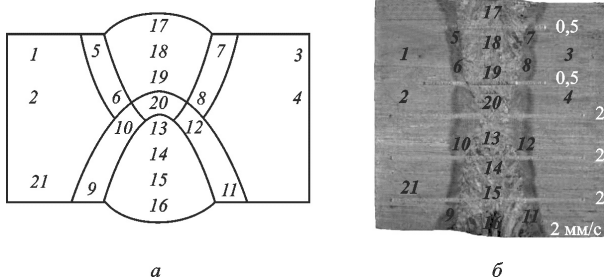


Рис. 1. Схема расположения точек замера твердости на схеме (а) и на образце (б):

1–21 — точки замера твердости (белым цветом показаны значения подачи, сопла гидроструйной установки, мм/с)

В качестве присадочных материалов применяли проволоку сварочную сплошного сечения марки L60 (0,05...0,15 % С; 0,8...1,25 % Мn; 0,1...0,35 % Si) диаметром 4 мм и флюс марки 761 (производства фирмы Lincoln Electric, США).

Структуру соединений исследовали на оптическом микроскопе Leica MDILM (Германия) с использованием программы Qwin (Германия) для анализа изображений, а также на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 3D FEG (США), оснащенном приставкой для микро-рентгеноспектрального анализа.

После сварки измеряли твердость по Виккерсу (HV 5) сварного шва и околошовной зоны на универсальном приборе Wilson Wolpert 930 N (США) вдавливанием индентора при нагрузке 50 Н.

Качество сварного шва диагностировали ультразвуковым воздействием, вызывающим образование гидрокаверны перпендикулярно поверхности сварного шва, при следующих режимах: давление струи воды 380 МПа; диаметр струи 0,2 мм; скорость подачи сопла гидроструйной установки 0,5 и 2 мм/с.

Твердость замеры по схеме, указанной на рис. 1, согласно ГОСТ 9013–59 (ИСО 6508–86) с помощью портативного твердомера МЕТ-ДУ с применением динамического датчика. В каждой точке делали четыре замера и фиксировали среднее значение, автоматически вычисляемое прибором.

На профилографе-профилометре БВ-7669М производства НИИ «Измерения» (Москва) были сняты профили по трассам (рис. 2). Трассы 1–6 проходили вдоль гидрокаверны, трассы 7.0–7.3 перпендикулярно гидрокаверне.

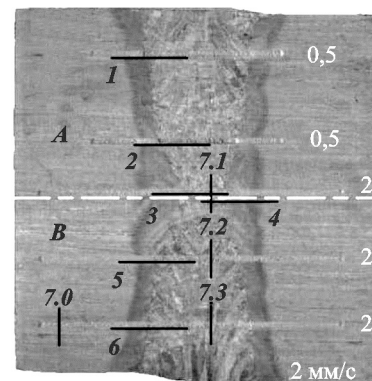


Рис. 2. Схемы трассирования сварного шва: А и В — зоны, где определяли ударную вязкость (белым цветом показаны значения подачи сопла гидроструйной установки, мм/с)

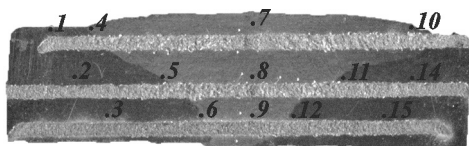


Рис. 3. Образец сварного шва с гидрокавернами, возникшими в результате ультраструйного воздействия на трех уровнях: верхнем (точки 1, 4, 7, 10), среднем (точки 2, 5, 8, 11, 14) и нижнем (точки 3, 6, 9, 12, 15)

Гидрокаверны присутствовали в поперечном сечении сварного шва на трех уровнях: верхнем, среднем и нижнем (рис. 3).

Ударную вязкость металла шва сварного соединения, полученного сваркой под флюсом, определяли испытаниями по методу Шарпи (KCV) на образцах типа X по ГОСТ 6996-66 при температуре -20 °С. Ударную вязкость металла сварного шва, полученного дуговой сваркой, определили также по методу Шарпи (KCU) на образцах типа VII по ГОСТ 6996-66 при температуре 20 °С.

Результаты исследований и их обсуждение.

Микроструктуру металла шва можно охарактеризовать как состоящую из лучистых кристаллов бейнита, окруженных полосами феррита и перлита. Кристаллы металла шва имеют строгую столбчатую направленность, характерную для сварного шва. В ней присутствуют бейнитная, ферритная и перлитная составляющие (рис. 4). Кристаллы бейнита, декорированные ферритно-перлитной смесью, имеют средний размер 400...600 мкм, средний размер полиэдрических зерен, из которых состоит феррит, 80...100 мкм.

Таблица 1
Зависимость глубины гидрокаверны от твердости материала

Номер трассы	Твердость материала НВ	Глубина гидрокаверны, мкм
7.0	225	49,7
7.1	331	45,4
7.2	283	55,5
7.3	257	100,6

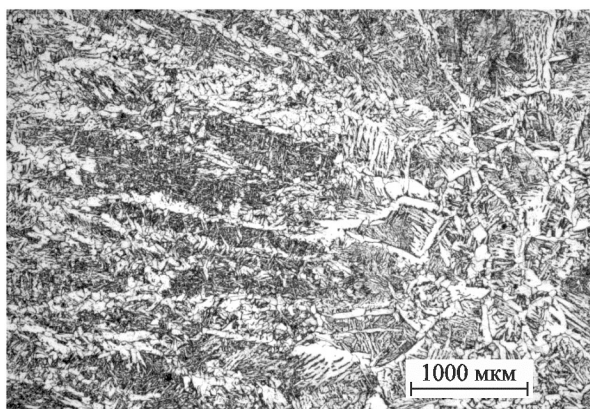
Для всех трасс наблюдается высокая корреляция между твердостью материала (табл. 1) и глубиной образовавшейся гидрокаверны.

Для трасс 7.1-7.3 отмечается монотонная зависимость глубины гидрокаверны от твердости материала. А в трассе 7.0, которая соответствует точке 21 замера твердости (см. рис. 1), наблюдается отступление от монотонности. Это можно объяснить тем, что точка 21 лежит вне зоны наплавляемого металла и зоны термического влияния, что, в свою очередь, позволяет сделать вывод об отсутствии разупрочнения металла в области точки 21.

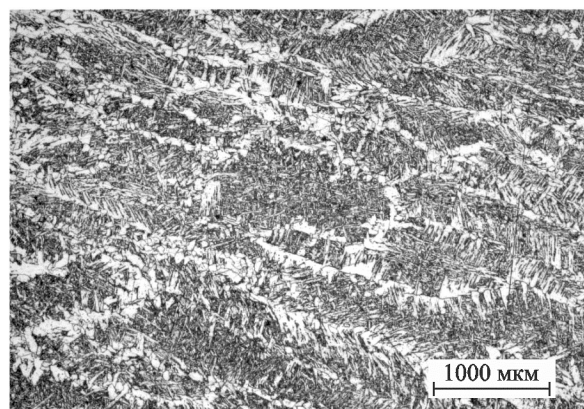
Ниже представлены результаты механических испытаний и замера твердости в точках согласно выбранной схеме (рис. 1, а).

Результаты механических испытаний сварного соединения пластин из низкоуглеродистой стали СтЗсп

	Твердость, НРС
Основной металл (области точек 1-4)	27,0...30,0
Зона термического влияния (области точек 5-12)	30,0...32,0
Зона шва (области точек 13-20)	32,0...34,0



а



б

Рис. 4. Микроструктура металла шва: а — линия сплавления; б — металл шва

Таблица 2

Результаты локальных замеров твердости

Номер точки замера твердости	Твердость НВ	Номер точки замера твердости	Твердость НВ
1	222	11	259
2	313	12	350
3	233	13	282
4	297	14	283
5	265	15	257
6	334	16	228
7	333	17	228
8	295	18	281
9	247	19	282
10	297	20	331

Из табл. 2 ясно, что твердость в зоне сварного соединения монотонно возрастает при переходе от основного металла к зонам термического влияния и шва в среднем на 15 %. Результаты измерений в точках показывают, что максимальная твердость отмечается в центре сварного шва, (трассы 7.1, 7.2, точки 6, 8, 10, 12, 20).

Сравниваем также глубину образовавшейся в результате ультразвуковой диагностики гидрокаверны и ударную вязкость (КСУ). Представленные в табл. 3 результаты показывают, что в середине шва с максимальной твердостью прочность ниже, чем в верхней и нижней частях шва.

Таблица 3

Результаты механических испытаний алюминиевого сварного шва, полученного ручной дуговой сваркой

Параметры	Область сварного шва		
	Верх	Середина	Низ
Предел прочности, МПа	862,0	839,0	855,0
Предел текучести, МПа	828,0	793,0	814,0
КСУ, кДж/см ² :			
зона А	525,0	656,0	833,0
зона В	630,0	909,0	778,0

Выводы

1. Ультразвуковая диагностика сварных швов является примером перспективной технологии, обладающей широкими функциональными возможностями. Эта технология может стать частью аппарата по обслуживанию элементов оборудования, включающего выбор рациональных режимов сварки на этапе технологической подготовки, оценку состояния действующих и ремонт вышедших из строя изделий.

2. Реализация предложенной идеи поможет создать высокоэффективный аппарат ультразвуковой диагностики, позволяющий оперативно решать ряд практически важных вопросов, связанных с оценкой качества сварных швов в материалах конструкций потенциально опасных объектов.

Литература

- [1] EN ISO 3834-2. Требования к качеству при сварке. Сварка плавлением металлических материалов. Ч. 2: Более высокие требования к качеству.
- [2] Бербасова Н.Ю., Куликов В.П., Основский В.А., Тарапсенко С.И. Управление качеством сварных конструкций на основе системно-процессного моделирования. *Сварочное производство*, 2008, № 3, с. 12–18.
- [3] Стеклов О.И. Сварка начала XXI века. *Территория Нефтегаз*, 2007, № 12, с. 44–53.
- [4] Cullison A., Johnsen M.R. Fifty Years of Welding's Latest and Best. *Welding Journal*, 2003, Mar, pp. 46–54.
- [5] Коновалов Н.Н., Щербаков Е.С. Совершенствование электронной базы средств неразрушающего контроля и его методическое обеспечение. *Сварочное производство*, 2014, № 9, с. 45–47.
- [6] Атрощенко В.В., Бычков В.М., Медведев А.Ю., Савичев М.П., Кривалев И.В. Неразрушающий контроль сварных соединений блисков, полученных линейной сваркой трением. *Сварка и диагностика*, 2014, № 4, с. 43–45.
- [7] Шаповалов Е.В., Галаган Р.М., Клишар Ф.С., Запара В.И. Современные методы и средства неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой (обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2013, № 1, с. 10–22.

- [8] Миронов С.Ю. Формирование зеренной структуры при сварке трением с перемешиванием. *Физическая мезомеханика*, 2014, т. 17, № 1, с. 103–113.
- [9] Кректулева Р.А., Черепанов О.И., Черепанов Р.О. Численное решение квазистатической задачи расчета остаточных напряжений в сварных швах с учетом фазовых превращений. *Физическая мезомеханика*, 2013, т. 16, № 6, с. 51–57.
- [10] Смирнов С.В., Пугачева Н.Б., Мясникова М.В., Смирнова Е.О. Структурная неоднородность сварного соединения алюминиевого сплава и моделирование его упругой деформации. *Физическая мезомеханика*, 2014, т. 17, № 1, с. 51–56.
- [11] Багаев И.А., Багаев А.А., Мали В.И., Багаев В.А., Балаганский И.А. Структурные изменения поверхностных слоев стальных пластин в процессе сварки взрывом. *Материаловедение и термическая обработка*, 2013, № 9, с. 19–24.
- [12] Макаров Э.Л. Компьютерная оценка свариваемости низколегированной стали. *Сварка и диагностика*, 2014, № 4, с. 23–29.
- [13] Бадалян В.Г., Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. Использование моделирования для оптимизации методик УЗК. *Сварка и диагностика*, 2014, № 6, с. 18–22.
- [14] Климов В.С., Комиринко А.В. Применение нейросетевых технологий распознавания образов для диагностики контактной сварки в производственной среде. *Сварка и диагностика*, 2013, № 2, с. 40–44.
- [15] Бигус Г.А., Травкин А.А., Даниев Ю.Ф. Вейвлет анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкций. *Сварка и диагностика*, 2012, № 4, с. 34–38.
- [16] Скачков И.О. Мониторинг качества контактной точечной сварки переменным током с применением вейвлет-анализа. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2012, № 3, с. 43–47.
- [17] Nonomura S., Hyoma K., Kobayashi K., Yamaoka H., Miyasaka F. Control of the Penetration Shape by Pulsed Current Waveform. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2015, vol. 33, no. 1, pp. 82–88.
- [18] Okabe T., Yasuda K., Nakata K. Dynamic Observations of Welding Phenomena and Finite Element Analysis in High Frequency Electric Resistance Welding. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2014, vol. 32, no. 3, pp. 156–163.
- [19] Процив Ю.В., Сапунов А.Л. Предотвращение трещинообразования при изготовлении сварных кольцевых заготовок из горячекатаных профилей стареющих никелевых сплавов. *Материаловедение и термическая обработка*, 2011, № 8, с. 19–24.
- [20] Sadasue T., Igi S., Taniguchi K., Ikeda R., Oi K. Fracture behavior and numerical study of resistance spot welded joints in high strength steel sheet. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2014, vol. 32, no. 2, pp. 64–72.
- [21] Morisada Y., Tamashiro K., Kamai M., Ueji R., Fujii H. Development of Small sized Friction Stir Welding Equipment for Hand-operated Welding. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2014, vol. 32, no. 2, pp. 52–56.
- [22] Козлов Д.М., Попович А.Л. Автоматизированный неразрушающий контроль кольцевых соединений трубопроводов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Сварка и диагностика*, 2014, № 5, с. 56–57.
- [23] Попов А.В. Оценка прочности сварных и паяных соединений конструкций ракетно-космической техники методом акустической эмиссии. *В мире неразрушающего контроля*, 2015, № 1(67), с. 10–13.
- [24] Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н. Исследование структуры сварных соединений при различных технологических параметрах сварки низколегированных сталей. *Материаловедение и термическая обработка*, 2014, № 2, с. 19–24.
- [25] Черняева Е.В., Галкин Д.И., Бигус Г.А., Мерсон Д.Л. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости. *Сварка и диагностика*, 2010, № 2, с. 50–56.
- [26] Гуменюк В.А., Казаков Н.А., Сульженко В.А. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки корпуса глубоководного аппарата. *В мире неразрушающего контроля*, 2007, № 1(35), с. 57–60.

- [27] Разыграев Н.П., Разыграев А.Н. Приемочный и эксплуатационный ультразвуковой контроль головными волнами эхо-методом. *В мире неразрушающего контроля*, 2007, № 4(38), с. 57–60.
- [28] Давыдов Д.М. Ультразвуковой контроль. Проблемы и их решения в тепловой и атомной энергетике. *Сварка и диагностика*, 2010, № 2, с. 57–60.
- [29] Бобров В.Т., Самокрутов А.А., Алехин С.Г., Бобров С.В. Исследование эмавтологии ультразвукового контроля контактной точечной сварки в автомобилестроении. *Сварка и диагностика*, 2014, № 4, с. 55–59.
- [30] Зуев Л.Б., Псахье С.Г., Оришич А.М., Ковалев О.Б., Юдина Е.В., Афонин Ю.В., Данилов В.И., Полетика Т.М. Структура и свойства сварных соединений, выполненных лазерной и точечной сваркой. *Физическая мезомеханика*, 2005, т. 8, спец. вып., с. 87–90.
- [31] Панин В.Е., Сапожников С.В., Каблов Е.Н., Плешанов В.С., Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Почивалов Ю.И., Кибиткин В.В., Напрюшкин А.А., Нехорошков О.Н., Лукин В.И. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12. *Физическая мезомеханика*, 2006, т. 9, № 2, с. 85–96.
- [32] Лобанов Л.М., Пивторак В.А. Диагностика конструкций методами электронной ширрографии и спекл-интерферометрии. *Сварка и диагностика*, 2014, № 2, с. 27–32.
- [33] Гончаров А.Л., Драгунов В.К., Слива А.П., Портнов М.А., Терентьев Е.В., Грибков М.С. Исследование сварных соединений разнородных сталей деталей магнитопровода, выполненных ЭЛС. *Сварка и диагностика*, 2014, № 5, с. 28–32.
- [34] Варовин А.Я., Карзов Г.П., Марголин Б.З. Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным неразрушающего контроля. *Вопросы материаловедения*, 2007, № 3, с. 169–186.
- [35] Antipov V.S., Vasil'ev V.D., Udralov Yu.I. Radiographic Inspection of the Weld Seams: Test Parameters. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 2, с. 106–110.
- [36] Matzkanin G.A., Yolken H.T. Selecting a Nondestructive Testing Method: Ultrasonic Testing. *Welding Journal*, 2008, May, pp. 26–32.
- [37] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. Анализ физико-технологических особенностей процесса ультраструйной диагностики. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2012, спец. вып., с. 7–18.
- [38] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Проваторов А.С., Хафизов М.В. Моделирование ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.

References

- [1] EN ISO 3834–2. *Trebovaniia k kachestvu pri svarke. Svarka plavleniem metallicheskih materialov. Chast' 2: Bolee vysokie trebovaniia k kachestvu* [Quality requirements for welding. Fusion welding of metallic materials. Part 2: Higher quality requirements]. 2005.
- [2] Berbasova N.Iu., Kulikov V.P., Osnovskii V.A., Tarapsenko S.I. Upravlenie kachestvom svarnykh konstruksii na osnove sistemno-protsessnogo modelirovaniia [Welded construction refinement on the base of the welding engineering system modelling]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2008, no. 3, pp. 12–18.
- [3] Steklov O.I. Svarka nachala XXI veka [Welding the beginning of the XXI century]. *Territoriia Neftegaz* [Territory Neftegaz]. 2007, no. 12, pp. 44–53.
- [4] Cullison A., Johnsen M.R. Fifty Years of Welding's Latest and Best. *Welding Journal*, 2003, Mar, pp. 46–54.
- [5] Konovalov N.N., Shcherbakov E.S. Sovershenstvovanie elektronnoi bazy sredstv nerazrushaiushchego kontrolia i ego metodicheskoe obespechenie [Electronic base updating of the nondestructive test devices and its methodological support]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding International]. 2014, no. 9, pp. 45–47.
- [6] Atroshchenko V.V., Bychkov V.M., Medvedev A.Iu., Savichev M.P., Krivalev I.V. Nerazrushaiushchii kontrol' svarnykh soedinenii bliskov, poluchennykh lineinoi svarkoi treniem [Non-destructive testing of welds blisks obtained linear friction welding]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 4, pp. 43–45.

- [7] Shapovalov E.V., Galagan R.M., Klishchar F.S., Zapara V.I. Sovremennyye metody i sredstva nerazrushaiushchego kontrolya svarnogo soedineniia, vypolnennogo kontaktnoi tochechnoi svarkoi (obzor) [Modern methods and means of nondestructive testing of welded joints made contact spot welding (Review)]. *Tekhnicheskaiia diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol'* [Technical Diagnostics and Nondestructive Testing]. 2013, no. 1, pp. 10–22.
- [8] Mironov S.Iu. Formirovanie zerennoi struktury pri svarke treniem s peremeshivaniem [Grain structure formation in friction stir welding]. *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2014, vol. 17, no. 1, pp. 103–113.
- [9] Krektuleva R.A., Cherepanov O.I., Cherepanov R.O. Chislennoe reshenie kvazistaticheskoi zadachi rascheta ostatochnykh napriazhenii v svarnykh shvakh s uchetom fazovykh prevrashchenii [Numerical solution of a quasistatic residual stress problem for welds with regard to phase transformations]. *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2013, vol. 16, no. 6, pp. 51–57.
- [10] Smirnov S.V., Pugacheva N.B., Miasnikova M.V., Smirnova E.O. Strukturnaia neodnorodnost' svarnogo soedineniia aliuminievogo splava i modelirovanie ego uprugoi deformatsii [Heterogeneity of an Al alloy weld and simulation of its elastic deformation]. *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2014, vol. 17, no. 1, pp. 51–56.
- [11] Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Bataev V.A., Balaganskii I.A. Strukturnye izmeneniia poverkhnostnykh sloev stal'nykh plastin v protsesse svarki vzryvom [Structural changes in the surface layers of steel plates in explosion welding]. *Materialovedenie i termicheskaiia obrabotka* [Materials and Heat Treatment]. 2013, no. 9, pp. 19–24.
- [12] Makarov E.L. Komp'yuternaia otsenka svarivaemosti nizkolegirovannoi stali [Computer assessment of the weldability of low-alloy steel]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 4, pp. 23–29.
- [13] Badalian V.G., Bazulin A.E., Bazulin E.G., Samarin P.F., Tikhonov D.S. Ispol'zovanie modelirovaniia dlia optimizatsii metodik UZK [Using simulation techniques to optimize the ultrasonic testing]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 6, pp. 18–22.
- [14] Klimov V.S., Komirenko A.V. Primenenie neirosetevykh tekhnologii raspoznavaniia obrazov dlia diagnostiki kontaktnoi svarki v proizvodstvennoi srede [Application of neural network pattern recognition technology for the diagnosis of resistance welding in the production environment]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2013, no. 2, pp. 40–44.
- [15] Bigus G.A., Tpvkin A.A., Daniev Iu.F. Veivlet-analiz signalov akusticheskoi emissii pri diagnostike konstruksii [Wavelet analysis of the acoustic emission signals during diagnosis designs]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2012, no. 4, pp. 34–38.
- [16] Skachkov I.O. Monitoring kachestva kontaktnoi tochechnoi svarki peremennym tokom s primeneniem veivlet-analiza [Monitoring the quality of resistance spot welding alternating current using wavelet analysis]. *Tekhnicheskaiia diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol'* [Technical Diagnostics and Nondestructive Testing]. 2012, no. 3, pp. 43–47.
- [17] Nonomura S., Hyoma K., Kobayashi K., Yamaoka H., Miyasaka F. Control of the Penetration Shape by Pulsed Current Waveform. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2015, vol. 33, no. 1, pp. 82–88.
- [18] Okabe T., Yasuda K., Nakata K. Dynamic Observations of Welding Pphenomena and Finite Element Analysis in High Frequency Electric Resistance Welding. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2014, vol. 32, no. 3, pp. 156–163.
- [19] Protsiv Iu.V., Sapunov A.L. Predotvrashchenie treshchinoobrazovaniia pri izgotovlenii svarnykh kol'tsevykh zagotovok iz goriachekatanykh profilei stareiushchikh nikelevykh splavov [Prevention of cracking in the manufacture of welded ring blanks of hot-rolled profiles aging nickel alloys]. *Materialovedenie i termicheskaiia obrabotka* [Materials and Heat Treatment]. 2011, no. 8, pp. 19–24.
- [20] Sadasue T., Igi S., Taniguchi K., Ikeda R., Oi K. Fracture behavior and numerical study of resistance spot welded joints in high strength steel sheet. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2014, vol. 32, no. 2, pp. 64–72.
- [21] Morisada Y., Tamashiro K., Kamai M., Ueji R., Fujii H. Development of Small sized Friction Stir Welding Equipment for Hand-operated Welding. *Transactions of the Japan welding society. Quarterly Journal of the Japan welding society*, 2014, vol. 32, no. 2, pp. 52–56.

- [22] Kozlov D.M., Popovich A.L. Avtomatizirovannyi nerazrushaiushchii kontrol' kol'tsevykh soedinenii truboprovodov, vypolnennykh kontaktnoi stykovoii svarkoi oplavleniem [Automated non-destructive testing of annular pipe connections made contact butt welding]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 5, pp. 56–57.
- [23] Popov A.V. Otsenka prochnosti svarnykh i paianykh soedinenii konstruksii raketno-kosmicheskoi tekhniki metodom akusticheskoi emissii [Strength Assessment of Space-Rocket Hardware Welded and Soldered Joints by Acoustic Emission Method]. *V mire nerazrushaiushchego kontroliia* [In the world of non-destructive testing]. 2015, no. 1(67), pp. 57–60.
- [24] Sivtsev M.N., Sleptsov G.N. Issledovanie struktury svarnykh soedinenii pri razlichnykh tekhnologicheskikh parametrakh svarki nizkolegirovannykh stalei [Investigation of the structure of welded joints at different technological parameters welding low alloy steels]. *Materialovedenie i termicheskaiia obrabotka* [Materials and Heat Treatment]. 2014, no. 2, pp. 19–24.
- [25] Cherniaeva E.V., Galkin D.I., Bigus G.A., Merson D.L. Primenenie metoda akusticheskoi emissii dlia nerazrushaiushchego kontroliia sostoianiiia osnovnogo metalla i svarnykh soedinenii truboprovodov, rabotaiushchikh v usloviakh malotsiklovoi ustalosti [Application of acoustic emission method for non-destructive monitoring of the base metal and welded joints of pipelines, operating under low-cycle fatigue]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2010, no. 2, pp. 50–56.
- [26] Gumeniuk V.A., Kazakov N.A., Sul'zhenko V.A. Akustiko-emissionnyi kontrol' protsessa svarki korpusa glubokovodnogo apparata [Akustiko emission control of the welding process deepwater housing unit]. *V mire nerazrushaiushchego kontroliia* [In the world of non-destructive testing]. 2007, no. 1(35), pp. 57–60.
- [27] Razygraev N.P., Razygraev A.N. Priemochnyi i ekspluatatsionnyi ul'trazvukovoi kontrol' golovnymi volnami ekho-metodom [Acceptance and operational control of the bow wave ultrasonic echo technique]. *V mire nerazrushaiushchego kontroliia* [In the world of non-destructive testing]. 2007, no. 4(38), pp. 57–60.
- [28] Davydov D.M. Ul'trazvukovoi kontrol'. Problemy i ikh resheniia v teplovoi i atomnoi energetike [Ultrasonic testing. Problems and solutions in thermal and nuclear power]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2010, no. 2, pp. 57–60.
- [29] Bobrov V.T., Samokrutov A.A., Alekhin S.G., Bobrov S.V. Issledovanie ematekhnologii ul'trazvukovogo kontroliia kontaktnoi tochechnoi svarki v avtomobilestroenii [Research ematechnologies ultrasonic testing resistance spot welding in the automotive industry]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 4, pp. 55–59.
- [30] Zuev L.B., Psakh'e S.G., Orishich A.M., Kovalev O.B., Iudina E.V., Afonin Iu.V., Danilov V.I., Poletika T.M. Struktura i svoistva svarnykh soedinenii, vypolnennykh lazernoii i tochechnoi svarkoi [Structure and properties of laser and spot welds]. *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2005, vol. 8, no. 5, pp. 87–90.
- [31] Panin V.E., Sapozhnikov S.V., Kablov E.N., Pleshanov V.S., Klimenov V.A., Ivanov Iu.F., Pochivalov Iu.I., Kibitkin V.V., Napriushkin A.A., Nekhoroshkov O.N., Lukin V.I. Vliianie ul'trazvukovoi udarnoi obrabotki na strukturu i soprotivlenie ustalosti svarnykh soedinenii vysokoprochnoi stali VKS-12 [Effect of ultrasonic shock treatment on the structure and fatigue strength of welded joints of high-strength steel VKS-12]. *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2006, vol. 9, no. 2, pp. 85–96.
- [32] Lobanov L.M., Pivtorak V.A. Diagnostika konstruksii metodami elektronnoi shirografii i spekl-interferometrii [Diagnosis structures using electron shearography and speckle interferometry]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 2, pp. 27–32.
- [33] Goncharov A.L., Dragunov V.K., Sliva A.P., Portnov M.A., Terent'ev E.V., Gribkov M.S. Issledovanie svarnykh soedinenii raznorodnykh stalei detalei magnitoprovoda, vypolnennykh ELS [Investigation of welded joints of dissimilar steels magnetic parts made ELS]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2014, no. 5, pp. 28–32.
- [34] Varovin A.Ia., Karzov G.P., Margolin B.Z. Problemy prognozirovaniia rabotosposobnosti konstruksii po dannym nerazrushaiushchego kontroliia [Problems of prediction of serviceability of structures from the nondestructive testing data]. *Voprosy materialovedeniia* [Inorganic Materials: Applied Research]. 2007, no. 3, pp. 169–186.

- [35] Antipov V.S., Vasil'ev V.D., Udralov Yu.I. Radiographic inspection of the weld seams: test parameters. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 2, pp. 106–110.
- [36] Matzkanin G.A., Yolken H.T. Selecting a Nondestructive Testing Method: Ultrasonic Testing. *Welding Journal*, 2008, May, pp. 26–32.
- [37] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskii A.L. Analiz fiziko-tekhnologicheskikh osobennostei protsessa ul'trastruinoi diagnostiki [Analysis of the physical and technological characteristics of the process of diagnosis ultra jet]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser Estestvennye nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences]. 2012, special is., pp. 7–18.
- [38] Abashin M.I., Galinovskii A.L., Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Provatorov A.S., Khafizov M.V. Modelirovanie ul'trastruinogo vozdeistviia dlia kontrolya kachestva pokrytii [Modeling of ultra-jet influence for coating quality control]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89.

Статья поступила в редакцию 10.10.2015

Информация об авторах

АБАШИН Михаил Иванович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: abashin@bmmstu.ru).

БОЧКАРЕВ Сергей Васильевич (Пермь) — доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации». Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Пермский край, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

ЦАПЛИН Алексей Иванович (Пермь) — доктор технических наук, зав. кафедрой «Общая физика». Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Пермский край, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: tai@pstu.ru).

КОБЕРНИК Николай Владимирович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: koberniknv@yandex.ru).

Information about the authors

ABASHIN Mikhail Ivanovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technologies of Rocket and Aerospace Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: abashin@bmmstu.ru).

BOCHKAREV Sergey Vasilevich (Perm) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Automation Microprocessors. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Perm Region, Russian Federation, Komsomolsky Prospekt, Bldg. 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

TSAPLIN Aleksey Ivanovich (Perm) — Doctor of Science (Eng.), Head of Department of General Physics. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Perm Region, Russian Federation, Komsomolsky Prospekt, Bldg. 29, e-mail: tai@pstu.ru).

KOBERNIK Nikolai Vladimirovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Welding Technology and Diagnostics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: koberniknv@yandex.ru).