

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»
Белорусский национальный технический университет
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Государственное научное учреждение
«Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси»

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ В НАУКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Сборник статей I Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 24–25 ноября 2022 года)

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2022

УДК 621.791
ББК 30.61
А43

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М. Е. Лустенков* (гл. редактор); д-р техн. наук, проф. *В. М. Пашкевич* (зам. гл. редактора); канд. техн. наук *А. М. Бодяко*; д-р техн. наук, проф. *Л. С. Денисов*; д-р техн. наук, проф. *Н. В. Коберник*; д-р техн. наук, проф. *Ю. С. Коробов*; канд. техн. наук, доц. *А. О. Коротеев*; д-р техн. наук, проф. *В. П. Куликов*; д-р техн. наук *С. В. Медведев*; д-р техн. наук, проф. *Ф. И. Пантелеенко*; д-р техн. наук, проф. *С. Г. Паршин*; *С. П. Сасновский*; *И. В. Брискина* (отв. секретарь)

А43 **Актуальные** вопросы и передовые технологии сварки в науке и промышленности: сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т, Белорус. нац. техн. ун-т; С.-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого; Объед. ин-т проблем информатики НАН Беларуси; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – 252 с.: ил. ISBN 978-985-492-284-3.

Представлены результаты эффективного применения современных технологий, оборудования и материалов для сварки и неразрушающего контроля сварных соединений в нефтехимии, энергетике, машиностроении и строительстве, а также проблемы подготовки специалистов в области сварки и родственных технологий.

Сборник статей предназначен для инженерно-технических и научных работников, аспирантов и студентов вузов.

**УДК 621.791
ББК 30.61**

ISBN 978-985-492-284-3

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарное заседание

АЛЕШИН Н. П. Мировые тенденции развития сварки и диагностики	9
КОБЕРНИК Н. В., ПАНКРАТОВ А. С. Государственное регулирование в области высшего образования в Российской Федерации и реализации программ высшего образования в МГТУ им. Н. Э. Баумана	11
ДРАГУНОВ В. К., РОДЯКИНА Р. В., РАГОЗИН Г. С. Разработки кафедры технологии металлов НИУ «МЭИ» в области электронно-лучевой сварки разнородных металлов и сплавов	13
БАДЬИН Ю. А. Технология оперативного ремонта реакторов замедленного коксования	19
БОЛОТОВ С. В., КУЛИКОВ В. П., КУКУШКИН Е. Д., РЕЕНТОВИЧ П. А. Методика расчета сварочного тока и управления процессом контактной рельефной сварки нахлесточных соединений	25
ГОНЧАРОВ А. Л., ДРАГУНОВ В. К., СЛИВА А. П., ЧУЛКОВ И. С. Исследование термоэлектрического эффекта и его влияния на электронный пучок в процессе сварки разнородных сталей	30
ДЕНИСОВ Л. С. Исследование действующей системы контроля «годен – негоден» и качества сварных соединений	36
ДЕНИСОВ Л. С. Система и механизмы обеспечения требуемого нормативного качества сборочно-сварочных процессов и соединений	43
ЕЛСУКОВ С. К., ЗОРИН И. В., НЕСИН Д. С. Перспективы применения расщепленного электрода для электродуговой наплавки коррозионно-стойких сталей	54
ЖЕЛЕЗНОВ В. Ю., РОГАЛИН В. Е., МАЛИНСКИЙ Т. В., МИКОЛУЦКИЙ С. И., ХОМИЧ Ю. В., ЛЮШИНСКИЙ А. В. ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И. Использование оптикопластического эффекта для предварительной подготовки поверхностей перед диффузионной сваркой	60
ЗАНКОВЕЦ П. В., ШКУРДЮК П. А. Компьютерные системы в автоматизации технологической подготовки сварочного производства и обеспечении требуемого качества сварных соединений	66
КАРАМИНАДИК И., ДЕМЧЕНКО Е. Б. Твердость сварных соединений материалов на основе «AL – сталь», полученных контактной точечной сваркой	73
КАРПЕЦ М. Н., ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И. Особенности применения защитных газотермических покрытий в калийной отрасли	78
КАРХИН В. А., АЛДАИЕ Я., СТАРОБИНСКИЙ Е. Б., ЛЕВЧЕНКО А. М. Анализ распределения водорода в неоднородных сварных соединениях	84

КЛИМОВ А. С., АНЦИБОРОВ А. Н. Повышение эффективности контактной сварки на машинах переменного тока	91
КОБЕРНИК Н. В. Современные подходы к разработке порошковых проволок для модифицирования и армирования наплавленного металла	97
КОВТУНОВ А. И., ЕЛЬЦОВ В. В., БОЧКАРЕВ А. Г., ХОХЛОВ Ю. Ю. Исследование влияния легирующих компонентов на жаростойкость наплавленных сплавов системы титан–алюминий	100
КОРОБОВ Ю. С., ПОТЕХИН Б. А., ФИЛИППОВ М. А., ШУМЯКОВ В. И., ДАВЫДОВ Ю. С., РАЗИКОВ Н. М. Разработка экономнолегированных порошковых проволок для сварки, наплавки, напыления	106
КОРОТЕЕВ А. О., ФЕТИСОВА Е. А. Дуговая сварка с функциональной модификацией защитной газовой атмосферы галоидными соединениями	112
КУЛИКОВ В. П. Центр сертификации и испытаний	119
ЛОЗИКОВ И. А., ЛОВШЕНКО Ф. Г. Получение модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз	124
ЛЮШИНСКИЙ А. В. Возможности диффузионной сварки при соединении металлических и неметаллических материалов	129
ЛЮШИНСКИЙ А. В., РОГАЛИН В. Е., МАЛИНСКИЙ Т. В., ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И. Лазерная обработка как метод интенсификации диффузионных процессов при сварке давлением	134
ЛЯПИН А. И. О термической ионизации и температуре сварочной дуги	140
МАЛИНСКИЙ Т. В., МИКОЛУЦКИЙ С. И., РОГАЛИН В. Е., ХОМИЧ Ю. В. Улучшение механических свойств диффузионно-сварных соединений сплавов при предварительной лазерной обработке	144
МАМОНОВ А. М. Математическая модель теплового расчета процесса сварки с сухим льдом	149
МЕДВЕДЕВ С. В. Основные направления цифровой трансформации объектов и процессов сборки-сварки	155
МЕДВЕДЕВ С. В., ЖУКОВЕЦ М. В. Компьютерные технологии прогнозирования остаточных сварочных явлений при дуговой сварке конструкций общего назначения	159
МЕДВЕДЕВ С. В., КОЖЕВНИКОВ М. М. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций с учетом требований парадигмы ИНДУСТРИЯ 4.0	164
ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И., БЕНДИК Т. И., СИДОРОВ В. А., СЕРЕДА В. Ю., ЛИТВИНКО А. А. Технология сварки биметаллических труб 304L/P265GH	170
ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И., БОРОДАВКО В. И., МАМОНОВ А. М., ШМУРАДКО Н. А., ШМУРАДКО В. Т. Техническая керамика (ТК): проблемы, принципы и механизмы научно-практической разработки и реализации в производстве профильных электротехнических материалов-изделий	176

ПОБОЛЬ А. И., ЗАЛЕССКИЙ В. Г. Оптимизация режимов электронно-лучевой наплавки однослойного покрытия при восстановлении изделий из титановых сплавов	183
ПОБОЛЬ И. Л., ЗАЛЕССКИЙ В. Г., ПОБОЛЬ А. И. Современные электронно-лучевые технологии	188
СЛИВА А. П., МАРЧЕНКОВ А. Ю., ЖГУТ Д. А., ПАНЬКИНА А. А., МАТЮНИН В. М. Влияние параметров развертки электронного луча на форму шва и механические свойства локальных зон сварного соединения стали 30ХГСА	194
ТРЕТЬЯКОВ А. С., КАПИТОНОВ О. А. Применение матричных преобразователей частоты в качестве трехфазных сварочных источников питания	201
УРБАНОВИЧ Н. И., БЕНДИК Т. И., СЕРЕДА В. Ю. Применение модификатора с ультрадисперсными частицами в составе шихты покрытия электрода УОНИ 13/55 и его влияние на свойства металла шва	205
ФЕДОСЕНКО А. С., ЛОВШЕНКО Ф. Г. Композиционные механически легированные порошки для нанесения газотермических покрытий и производства изделий послойным синтезом	209
ФУРМАНОВ С. М., ЮМАНОВ Д. Н., СЕРГЕЙЧИК А. О., ЕРМОЛЕНКО Р. А. Разработка программного кода адаптивной системы регулирования мощности при рельефной сварке	215
ЧИЖ О. П., МЕДВЕДЕВ С. В. Научно-практические результаты суперкомпьютерных программ СКИФ Союзного государства для технической подготовки сборочно-сварочных производств	221
ЧИЖ О. П., СЕМЕНЯК Н. С., МЕДВЕДЕВ С. В. Технологические возможности научно-образовательного ГРИД-сегмента сборочно-сварочной направленности	227
ШНИП Д. В., ЛЕНЕВСКИЙ Г. С. Автоматизированные системы контроля качества сварных соединений при производстве молочных такси	231
ЩЕРБАКОВ А. В., ГАПОНОВА Д. А., СЛИВА А. П., РОДЯКИНА Р. В., ГУДЕНКО А. В., ГОНЧАРОВ А. Л., ДРАГУНОВ В. К. Разработки НИУ «МЭИ» в области управления процессом электронно-лучевой наплавки с подачей присадочной проволоки	235
ЮМАНОВ Д. Н., ФУРМАНОВ С. М., МЕЛЬНИКОВ С. Ф. Особенности контактной рельефной сварки Т-образных соединений с применением системы программного управления мощностью тепловложения	241
ЯКУБОВИЧ Д. И., ШАБЛОВСКИЙ А. В. Исследование металлургических процессов растворения кремния и углерода в сварочной ванне при дуговой сварке	247

CONTENTS

Plenary session

ALESHIN N. P. World trends in the development of welding and diagnosis	9
KOBERNIK N. V., PANKRATOV A. S. State regulation in the field of higher education in the Russian Federation and the implementation of higher education programs in MSTU im. N. E. Bauman	11
DRAGUNOV V. K., RODYAKINA R. V., RAGOZIN G. S. Developments of metals technology department of NRU «MPEI» in the field of electron-beam welding of dissimilar metals and alloys	13
BADIN YU. A. Technology of operational repair for delayed coking reactors	19
BOLOTOV S. V., KULIKOV V. P., KUKUSHKIN E. D., REENTOVICH P. A. Methodology for calculation of welding current and control of contact relief welding of overlapping joints	25
GONCHAROV A. L., DRAGUNOV V. K., SLIVA A. P., CHULKOV I. S. Thermoelectric effect and its influence on the electron beam during welding of dissimilar steels investigation	30
DENISOV L. S. Research of the present «FIT OR NOT FIT» control system and the quality of welded joints	36
DENISOV L. S. System and mechanisms for ensuring the required regulatory quality of assembly and welding processes and joints	43
ELSUKOV S. K., ZORIN I. V., NESIN D. S. Prospects for the application of a twin electrode for electric arc surfacing of corrosion-resistant steels	54
ZHELEZNOV V. YU., ROGALIN V. E., MALINSKIY T. V., MIKOLUTSKIY S. I., KHOMICH YU. V., LIUSHINSKII A. V., PANTELEYENKO F. I. The use of the optoplastic effect for the preliminary preparation of surfaces before diffusion welding	60
ZANKOVETS P. V., SHKOURDUKE P. A. Computer systems in welding fabrication process design automation and welded joints quality assurance	66
KARAMINADIK I. (Iran), DEMCHENKO E. B. Hardness of materials welded joints on the ground an al-steel gained by contact spot welding	73
KARPETS M. N., PANTELEENKO F. I. Features of the application of protectivethermal gas coatings in the potassium industry	78
KARKHIN V. A., ALDAIEE Y., STAROBINSKII E. B., LEVCHENKO A. M. Analysis of hydrogen distribution in heterogeneous welded joints	84
KLIMOV A. S., ANTSIBOROV A. N. Increasing the efficiency of resistance welding on ac machines	91

KOBERNIK N. V. Modern approaches to the development of flux-correct wires for modification and reinforcement of welded metal	97
KOVTUNOV A. I., ELTSOV V. V., BOCHKAREV A. G., KHOKHLOV YU. YU. Investigation of the influence of alloying components on the heat resistance of welded alloys of the titanium-aluminum system	100
KOROBOV YU. S., POTEKHIN B. A., FILIPPOV M. A., SHUMYAKOV V. I., DAVYDOV YU. S., RAZIKOV N. M. Development of economically allowed flux-cored wires for welding, surfacing, thermal spraying	106
KARATSEYEU A. O., FIATISAVA E. A. ARC welding with functional modification of protective gas atmosphere with haloide compounds	112
KULIKOU V. P. Certification and testing center	119
LOZIKOV I. A., LOVSHENKO F. G. Obtaining modifying ligatures with a high content of the alloying component for the production of chrome bronzes	124
LIUSHINSKII A. V. Possibility of diffusion welding for jointed of metallic and non-metallic materials	129
LIUSHINSKII A. V., ROGALIN V. E., MALINSKIY T. V., PANTELEYENKO F. I. Laser elaboration as method of intensification of diffusion processes at pressure welding	134
LYAPIN A. I. On thermal ionization and welding arc temperature	140
MALINSKIY T. V., MIKOLUTSKIY S. I., ROGALIN V. E., KHOMICH YU. V. Improvement of the mechanical properties of diffusion-welded alloy joints due to preliminary laser processing	144
MAMONOV A. M. Mathematical model of the thermal calculation of the dry ice welding process	149
MEDVEDEV S. V. Main directions of digital transformation of objects and assembly-welding processes	155
MEDVEDEV S. V., ZUKOVEC M. V. Computer technologies for prediction of residual welding phenomena in arc welding of general purpose constructions	159
MEDVEDEV S. V., KOZHEVNIKOV M. M. Structural and technological design of welded constructions taking into account the requirements of the INDUSTRY 4.0 paradigm	164
PANTELEYENKO F. I., BENDIK T. I., SIDOROV V. A., SEREDA V. Y., LITVINKO A. A. Welding technology of the bimetallic pipes 304L/P265GH	170
PANTELEENKO F. I., BORODAVKO V. I., MAMONOV A. M., SHMURADKO N. A., SHMURADKO V. T. Technical ceramics (TC): problems, principles and mechanisms of scientific and practical development and implementation of specific electrical materials-products in production	176
POBOL A. I., ZALESSKI V. G. Optimization of electron-beam surfacing modes for single-layer coating when restoring products from titanium alloys	183
POBOL I. L., ZALESSKI V. G., POBOL A. I. Modern electron-beam technologies	188

SLIVA A. P., MARCHENKOV A. YU., ZHGUT D. A., PANKINA A. A., MATIUNIN V. M. Influence of electron beam oscillation parameters on weld shape and mechanical properties of steel 30KHGSA weld local zones	194
TRETSIAKOU A. S., KAPITONAU O. A. Application of matrix frequency converters as threephase welding power supplies	201
URBANOVICH N. I., BENDIK T. I., SEREDA V. Y. Applications of the modifier with ultrafine particles in the composition of the coating charge of the UONI 13/55 electrode and its effect on the properties of the weld metal	205
FEDOSENKO A. S., LOVSHENKO F. G. Composite mechanically alloyed powders for deposition of gas thermal coatings and production of products by layered synthesis	209
FURMANOV S. M., YUMANOV D. N., SERGEYCHIK A. O., ERMOLENKO R. A. Development of the software code of the adaptive power regulation system for projection welding	215
TCHIJ O. P., MEDVEDEV S. V. Scientific and practical results of SKIF supercomputer programs of the Union State for the technical preparation of assembly and welding industries	221
TCHIJ O. P., SEMENIAK N. S., MEDVEDEV S. V. Technological capabilities of the scientific and educational grid segment assembly and welding orientation	227
SHNIP D. V., LENEVSKY G. S. Automated quality control systems for welded joints in the production of dairy taxis	231
SHCHERBAKOV A. V., GAPONOVA D. A., SLIVA A. P., RODYAKINA R. V., GUDENKO A. V., GONCHAROV A. L., DRAGUNOV V. K. Developments of NRU «MPEI» in the field of wire-based electron beam welding deposition control	235
YUMANOV D. N., FURMANOV S. M., MELNIKOV S. F. Features of resistance projection welding of T-shaped joints with the applying of heat input programmed control system	241
YAKUBOVICH D. I., SHABLOVSKY A. V. Investigation of metallurgical processes of dissolution of silicon and carbon in a welding bath during arc welding	247

УДК 621.791; 620.179

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СВАРКИ И ДИАГНОСТИКИ

Н. П. АЛЕШИН

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия

UDC 621.791; 620.179

WORLD TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF WELDING AND DIAGNOSIS

N. P. ALESHIN

Аннотация. Показаны мировые тенденции развития в области сварки и неразрушающего контроля. Продемонстрированы достижения в области разработки адаптивных и автоматизированных комплексов для сварки, в области аддитивного производства, а также автоматизированного неразрушающего контроля.

Ключевые слова: сварка, диагностика, роботизация, автоматизация.

Abstract. World development trends in the field of welding and non-destructive testing are shown. Achievements in the development of adaptive and automated complexes for welding, in the field of additive manufacturing, as well as automated non-destructive testing were demonstrated.

Keywords: welding, diagnostics, robotization, automation.

Мировые тенденции развития сварки и диагностики лежат в плоскости автоматизации, роботизации, а также в области создания адаптивных комплексов для максимального исключения субъективного фактора как в сварочном производстве, так и в неразрушающем контроле. Также активное развитие имеют аддитивные технологии, относящиеся к родственным процессам.

Значительный прирост в развитии сварочной техники и технологий наблюдается для сварки трением с перемешиванием, лазерной сварки и роботизированной сварки.

В адаптивных технологиях применяются современные подходы управления процессом сварки с помощью нейросетевых моделей, позволяющие нивелировать несовершенство сборки, а также других возмущений. В частности, такой подход был заложен в основу создания опытного образца роботизированного сварочного комплекса для сварки магистральных газопроводов. Данное оборудование на порядок дешевле

импортных аналогов и позволяет получить качественные соединения с меньшей квалификацией оператора.

Также представлены системы автоматической аргоно-дуговой сварки с контролем проплавления и наведением на стык, системы гибридной сварки труб большого диаметра.

Особое внимание уделено технологиям аддитивного производства и показана установка проволоочно-композиционного синтеза, использующая революционную схему аддитивного процесса.

Отдельный акцент сделан на новых разработках в области неразрушающего контроля. Отмечено, что сегодня порядка 80 % оборудования приходится на ультразвуковой контроль. Представлены установки для УЗК, разработанные и уже внедренные в производство. К таким установкам можно отнести серию установок «Автокон», которые применяются для контроля сварных соединений и тела труб, резервуаров и других конструкций. Представлены роботизированный комплекс для УЗК деталей из ПКМ и система контроля технического состояния подводных объектов. Последняя установка создана на базе подводного робота и имеет возможность решать обширные задачи.

УДК 378

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОГРАММ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА**

Н. В. КОБЕРНИК, А. С. ПАНКРАТОВ

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
Москва, Россия

UDC 378

**STATE REGULATION IN THE FIELD OF HIGHER EDUCATION IN THE
RUSSIAN FEDERATION AND THE IMPLEMENTATION OF HIGHER
EDUCATION PROGRAMS IN MSTU IM. N. E. BAUMAN**

N. V. KOBERNIK, A. S. PANKRATOV

Аннотация. Рассмотрено государственное регулирование в области высшего образования в Российской Федерации. Показано отличие самостоятельных устанавливаемых образовательных стандартов от федеральных государственных образовательных стандартов на примере реализации программ высшего образования уровня специалитет и магистратура в МГТУ им. Н.Э. Баумана в области машиностроения.

Ключевые слова: образовательный стандарт, компетенции, специалитет, магистратура.

Abstract. The state regulation in the field of higher education in the Russian Federation is considered. The difference between independent established educational standards and federal state educational standards is shown on the example of the implementation of higher education programs at the level of specialist and master's degree at Moscow State Technical University N. E. Bauman in the field of mechanical engineering.

Keywords: educational standard, competencies, specialty, magistracy.

Регулированием высшего образования в Российской Федерации занимается Министерство науки и высшего образования. Регулирование идет при помощи федеральных государственных образовательных стандартов. Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) – это совокупность требований, обязательных при реализации основных образовательных программ начального общего, основного общего, среднего (полного) общего, начального профессионального, среднего профессионального и высшего профессионального образования образовательными учреждениями, имеющими государственную аккредитацию. Стандарт

обеспечивает единство образовательного пространства Российской Федерации и преемственность основных образовательных программ начального общего, основного общего, среднего (полного) общего, начального профессионального, среднего профессионального и высшего профессионального образования.

ФГОС высшего профессионального образования разрабатывается учебно-методическими объединениями вузов по соответствующим направлениям подготовки (специальностям).

МГТУ им. Н. Э. Баумана, который имеет статус национального исследовательского университета, в соответствии с Федеральным законом об образовании имеет право вести образовательную деятельность на основе самостоятельно устанавливаемых образовательных стандартов (СУОС). СУОС строятся на базе соответствующих ФГОС: собственные универсальные компетенции СУОС полностью построены на универсальных компетенциях ФГОС; собственные общепрофессиональные компетенции полностью реализуют общепрофессиональные компетенции ФГОС, но к ним добавлены дополнительные компетенции. Отличительной особенностью СУОС от ФГОС является наличие собственных обязательных общепрофессиональных компетенций, а также собственных профессиональных компетенций для каждой специализации ФГОС. Необходимые компетенции формируются на основе запроса работодателей, а также соответствующих профессиональных стандартов. Также отличительной особенностью СУОС в МГТУ является срок обучения на уровне специалитета: 5 лет и 10 месяцев.

Кафедра «Технологии сварки и диагностики» реализует образовательные программы высшего образования по уровням подготовки специалитет и магистратура в области машиностроения. Специалисты проходят обучение по СУОС 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов», студенты могут пройти обучение по двум специализациям: «Проектирование технологических комплексов в сварочном производстве» и «Проектирование технологических комплексов неразрушающего контроля». Магистры проходят обучение по СУОС 15.04.01 «Машиностроение» по направлению «Технология и оборудование сварочных процессов».

УДК 621.791.7

**РАЗРАБОТКИ КАФЕДРЫ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ НИУ «МЭИ»
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

В. К. ДРАГУНОВ, Р. В. РОДЯКИНА, Г. С. РАГОЗИН

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 621.791.7

**DEVELOPMENTS OF METALS TECHNOLOGY DEPARTMENT
OF NRU «MPEI» IN THE FIELD OF ELECTRON-BEAM WELDING
OF DISSIMILAR METALS AND ALLOYS**

V. K. DRAGUNOV, R. V. RODYAKINA, G. S. RAGOZIN

Аннотация. Представлены отдельные результаты работ специалистов кафедры «Технологии металлов» НИУ «МЭИ» и созданного на ее основе научно-производственного и образовательного центра по электронно-лучевой сварке изделий из разнородных металлов и сплавов. Продемонстрированы возможности электронно-лучевых технологий в этой области.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронно-лучевая наплавка, разнородные металлы и сплавы, неразъемное соединение.

Abstract. Some results of the work of specialists from Metals Technology Department of National Research University «MPEI» and its scientific, production and educational center for electron beam welding of products from dissimilar metals and alloys are presented. The possibilities of electron-beam technologies in this area are demonstrated.

Keywords: electron-beam welding, electron beam surfacing, dissimilar metals and alloys, one-piece connection.

В современных условиях активного совершенствования мировой рыночной экономики кафедра «Технологии металлов» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» и созданный на ее основе научно-производственный и образовательный центр являются одним из флагманов развития электронно-лучевых технологий в России.

Одним из направлений деятельности центра является проведение исследований с целью выявления возможностей применения электронно-лучевых технологий для сварки изделий из разнородных металлов и сплавов, а также выполнение работ по электронно-лучевой сварке таких изделий толщиной 0,3...100 мм.

Электронно-лучевая сварка переходников трубопроводов из разнородных сталей.

Так, например, применительно к трубопроводам сотрудниками центра были разработаны меры по увеличению предельной температуры эксплуатации разнородных соединений, входящих в состав трубопроводов, за счет использования комбинированных переходников из разнородных (аустенитных и перлитных) сталей (рис. 1).



Рис. 1. Переходник из разнородных сталей.
Внешний вид соединения

В процессе эксплуатации при рабочих температурах в сварных соединениях разнородных труб из-за существенного различия коэффициентов линейного расширения могут возникать дополнительные термические напряжения (наибольшая разница в коэффициентах линейного расширения, достигающая 25 %...35 %, имеется между сталями перлитного и аустенитного классов). Совместное действие этих напряжений и остаточных сварочных и рабочих напряжений может в итоге приводить к

разрушению трубопроводов. Особенно велика опасность такого разрушения при циклических нагрузках трубопроводов, которые работают в температурном диапазоне интенсивного образования диффузионных прослоек. В комбинированных переходниках из разнородных сталей используются перлитные стали с более высоким содержанием карбидообразующих элементов, чем в свариваемых перлитных сталях. Помимо этого, в ходе изготовления таких переходников на перлитную сталь обычно наплавляют защитный облицовочный слой с еще более высоким содержанием сильных карбидообразующих элементов, а электронно-лучевая сварка выполняется с присадочными материалами с высоким содержанием никеля. Преимущества такого способа становятся очевидными при монтаже и выполнении ремонта конструкций: переходник в этом случае может быть изготовлен в цеховых условиях независимо от конструкции, а в ходе монтажа выполняют сварку только однородных соединений. Предлагаемая технология позволяет значительно повысить качество соединения разнородных сталей, сварка которых выполняется в цеховых условиях, а не в ходе монтажа; достижение подобного качества в условиях монтажа в настоящее время практически нереализуемо.

Такие переходники можно использовать как для непосредственного соединения труб, так и изготавливать из них другие детали, например штуцеры (их можно применять, к примеру, для соединения парогенератора из стали 20К с трубопроводами из стали 08X18H10T).

Электронно-лучевая сварка тонкостенных изделий с массивными деталями из разнородных цветных металлов и сплавов на их основе.

Электронно-лучевая сварка является наиболее перспективным способом получения неразъемных соединений в случае сварки изделий из цветных металлов и сплавов, особенно когда требуется обеспечить высокую степень защиты металла шва. Специалистами научно-производственного центра кафедры «Технологии металлов» были разработаны соответствующие технологии, которые позволяют получать сварные соединения тонкостенных изделий

с массивными деталями из разнородных цветных металлов и сплавов на их основе.

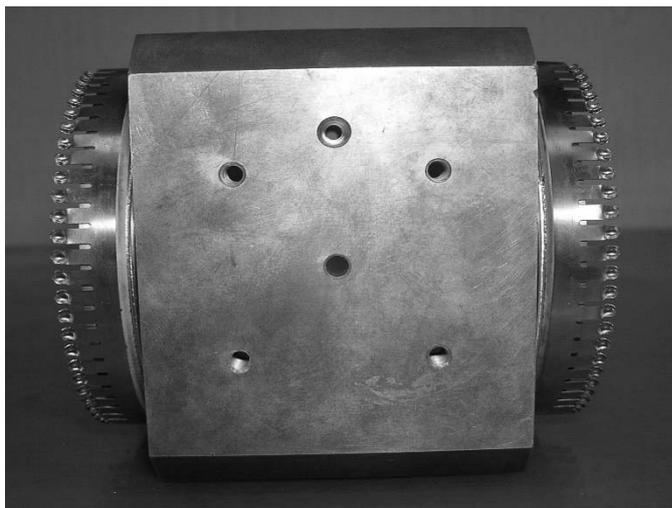


Рис. 2. Сварная конструкция применяемого в большом адронном коллайдере элемента измерительного устройства из меди и фольги бериллиевой бронзы

модель формирования сварного шва с учетом особенностей распространения теплоты и поведения сварочной ванны при воздействии концентрированного источника энергии (электронный луч).

Кроме того, установлено, что при сварке деталей из разнородных материалов на формирование сварного шва сильно влияют физические явления, связанные с процессами испарения, смачивания и формирования химического состава металла сварочной ванны, поэтому необходимы их обязательный учет и контроль при разработке технологии сварки.

На рис. 2 показан пример реализации такой технологии – сварная конструкция применяемого в большом адронном коллайдере элемента измерительного устройства из меди и фольги бериллиевой бронзы (толщиной менее 0,3 мм). Особенностью формирования сварного соединения в этом случае является заметное влияние толщины и формы соединяемых деталей. Для получения качественных сварных соединений для тонкостенных или разнотолщинных изделий необходимо строго дозированное, локальное подведение энергии, которое обеспечивается применением электронно-лучевой технологии. Вакуум обеспечивает дополнительную защиту металла шва, поэтому электронно-лучевая сварка для таких изделий является наиболее перспективным способом получения неразъемных соединений.

Для повышения качества получаемых сварных конструкций при электронно-лучевой сварке массивных деталей и тонкостенных элементов специалистами центра предложено использовать новую

Электронно-лучевая сварка (наплавка) меди и сплавов на ее основе со сталями разных структурных классов.

В настоящее время в промышленности широко используют комбинированные конструкции, причем для более рационального применения в них дорогостоящих материалов (например, меди) такие материалы стараются использовать только для тех частей изделий, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики изделий. Все остальные, в том числе наиболее массивные части таких комбинированных конструкций, стараются изготавливать из более дешевых материалов (например, из стали). Помимо удешевления таких конструкций и экономии дорогостоящих материалов, такой подход позволяет снизить общий вес конструкции, что особенно актуально, например, для аэрокосмической техники.

В комбинированных конструкциях из стали и сплавов на основе меди для соединения отдельных ее частей целесообразно использовать сварку, т. к. механическое крепление во многих случаях оказывается трудно-выполнимым и ненадежным в эксплуатации. При этом электронно-лучевая сварка является наиболее предпочтительной, т. к. позволяет обеспечить высокую концентрацию энергии (в диапазоне от 10^4 до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²) в зоне действия луча в сочетании с минимальной зоной термического влияния и максимальной степенью защиты обрабатываемого материала от влияния атмосферных газов (процесс сварки проходит в вакууме). На кафедре «Технологии металлов» проводились работы по разработке технологии электронно-лучевой сварки сталей разных структурных классов с медью или сплавами на ее основе, которая позволила бы обеспечить требуемые химсостав, структуру и свойства получаемых сварных соединений применительно к комбинированным конструкциям.

Так, для повышения качества применяемых в электрических машинах токосъемных колец из хромистой бронзы БрХ08 специалистами научно-производственного центра кафедры «Технологии металлов» был предложен метод изготовления таких колец из цилиндрической сварной трубы. Вплоть до настоящего времени для изготовления токосъемных колец использовались различные методы литья, однако они не всегда позволяют получить изделия высокого качества из-за наличия в получаемых отливках пор и раковин. В соответствии с предложенным сотрудниками кафедры «Технологии металлов» методом после вальцовки сварка продольного стыка трубы выполняется электронным лучом, что позволяет значительно повысить качество получаемых изделий. Внешний вид заготовки для изготовления токосъемных колец и макрошлиф полученного сварного соединения представлены на рис. 3. Однако при реализации данного метода коэффициент использования материалов имеет очень низкие значения.

Вследствие этого специалистами центра был предложен способ сварки (наплавки) бронзы БрХ08 со сталями разных классов, позволяющий значительно снизить расход бронзы, уменьшить вес получаемых изделий и повысить их прочность (рис. 4).

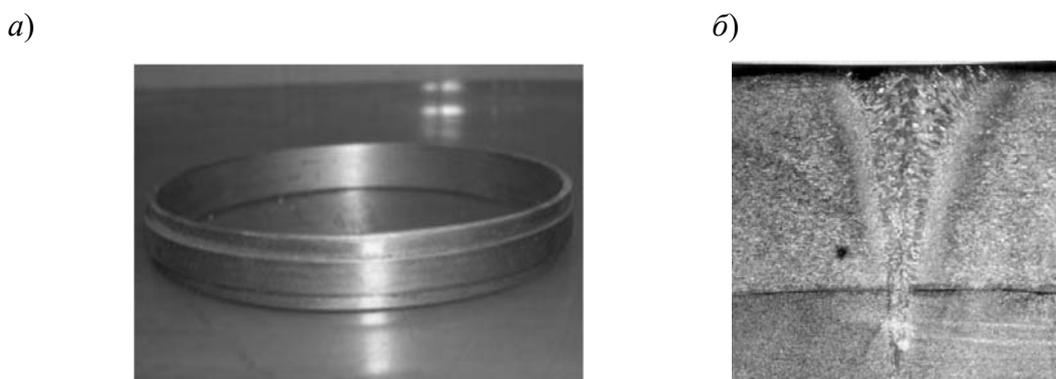


Рис. 3. Внешний вид заготовки для изготовления токосъемного кольца из бронзы БрХ08 и стали перлитного класса (а) и макрошлиф полученного сварного соединения (б)

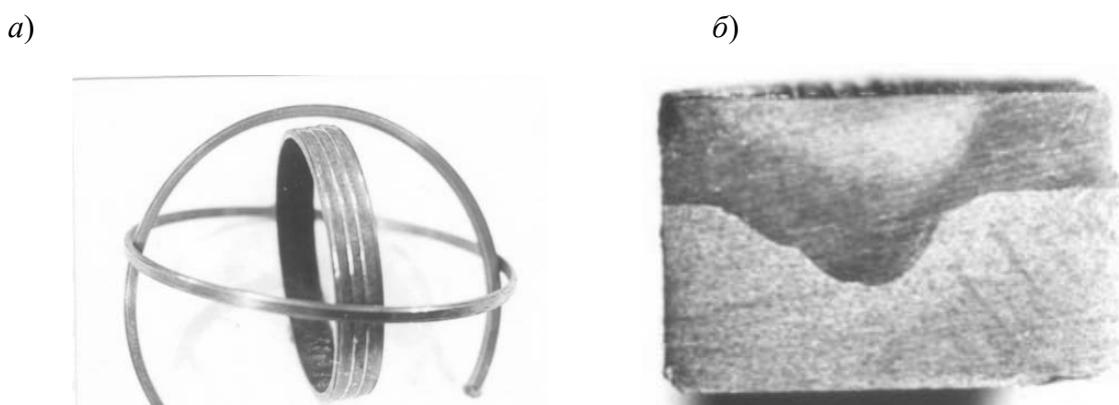


Рис. 4. Внешний вид заготовки после электронно-лучевой наплавки бронзы БрХ08 (а) и макрошлиф полученного соединения бронзы со сталью (б)

Электронно-лучевая сварка комбинированных конструкций из разнородных сталей и сплавов.

В настоящее время самое широкое применение в электромагнитных устройствах находят роторы, отдельные элементы которых изготавливаются из разнородных сталей. На эксплуатационные свойства таких роторов значительное влияние оказывают выбор материалов и свойства соединяемых элементов конструкции. Конструкция роторов в этом случае чаще всего состоит из чередующихся ферро- и парамагнитных элементов, соединенных в единое целое, с весьма высокими требованиями к качеству и стабильности получаемых соединений. Помимо высокой прочности, такие соединения должны иметь четкие границы раздела ферро- и парамагнитных элементов.

Для изготовления биметаллических деталей роторов могут быть использованы различные способы: дуговая сварка или наплавка, пайка, наплавка расплавленным присадочным сплавом, горячее изостатическое прессование и некоторые др. Основными недостатками этих способов являются либо низкая прочность соединений, либо достаточно большие размеры переходных зон от магнитного элемента к немагнитному, либо ограниченное количество пар соединяемых материалов. Все эти недостатки могут быть устранены путем

использования электронно-лучевой сварки, которая обеспечивает незначительные деформации изделий, минимальную зону термического влияния и минимальный объем переплавленного металла, а также прочность, близкую к прочности основных материалов.

Специалистами научно-производственного центра кафедры «Технологии металлов» разработана технология электронно-лучевой сварки, применяемая для изготовления биметаллических деталей роторов. Данная технология позволяет обеспечить получение изделий высокого качества благодаря исключению образования трещин, пор и других дефектов, достижению необходимой степени проплавления кромок, ограниченному развитию химической и структурной неоднородности в металле шва и зоне термического влияния, а также снижению уровня дополнительных остаточных напряжений, которые не снимаются последующей термической обработкой. На рис. 5 показан внешний вид биметаллических роторов, для изготовления которых применялась электронно-лучевая сварка: из стали 13X12H2M2BΦAB (ЭП517) и сплава ХН36ТЗБЗКЗЮ2 (ВУС-17) (см. рис. 5, а) и из стали 02X12К12Д2 (ДИ48) и сплава ХН40МТЮБР (ДИ49) (см. рис. 5, б).

а)



б)

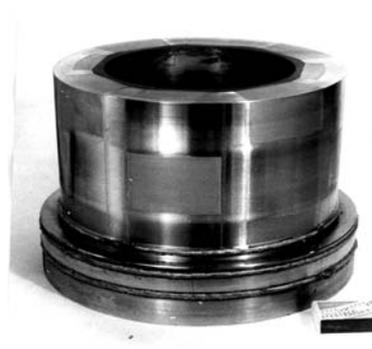


Рис. 5. Биметаллические роторы, изготовленные с применением электронно-лучевой сварки: а – из стали 13X12H2M2BΦAB (ЭП517) и сплава ХН36ТЗБЗКЗЮ2 (ВУС-17); б – из стали 02X12К12Д2 (ДИ48) и сплава ХН40МТЮБР (ДИ49)

Заключение. Использование электронно-лучевых технологий при изготовлении комбинированных конструкций в сравнении с традиционными способами сварки и наплавки является крайне перспективным, т. к. позволяет добиться значительного улучшения эксплуатационных свойств изделий из разнородных материалов, а также повышения ряда экономических показателей. Однако внедрение электронно-лучевых технологий в промышленное производство сдерживается в силу ряда причин, и прежде всего из-за отсутствия надежных методов управления качеством получаемых сварных соединений.

E-mail: reginarodyakina@mail.ru.

УДК 620.191.33

**ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО РЕМОНТА РЕАКТОРОВ
ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ****Ю. А. БАДЬИН**

ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование»

Волгоград, Россия

UDK 620.191.33

**TECHNOLOGY OF OPERATIONAL REPAIR FOR DELAYED COKING
REACTORS****YU. A. BADIN**

Аннотация. В ходе эксплуатации фиксируется большое количество повреждений на корпусах реакторов замедленного коксования (РЗК) или коксовых камер – образование местных деформаций и растрескивание сварных соединений. Применение хромомолибденовых сталей для изготовления РЗК создает трудности при проведении сварочных работ вследствие склонности таких сталей к подкалке. Это обуславливает желательность применения аустенитного варианта сварки. Предлагаются рекомендации по выбору электродных материалов для предотвращения возникновения повреждений.

Ключевые слова: реактор замедленного коксования, коксовая камера, разнородные сварные соединения.

Abstract. During operation, a large number of damages are recorded in the delayed coking reactors (DCR) or coke drums - the formation of local deformations (corrugations) and cracking of welded joints. The use of chromium-molybdenum steels for the manufacture of RPC creates difficulties during welding operations due to the propensity of such steels to lining. This determines the desirability of using an austenitic welding option. Recommendations on the choice of electrode materials to prevent damage are offered.

Keywords: delayed coking reactor, coke drum, dissimilar welding.

Проблема проведения ремонтной сварки РЗК. Процесс замедленного коксования характеризуется высокими значениями температуры (до 500 °С) и циклическим характером эксплуатации РЗК, что обуславливает широкое применение теплоустойчивых хромомолибденовых сталей для их изготовления. Для этого в отечественной практике широкое распространение получила хромомолибденовая сталь 12ХМ. Для РЗК, закупаемых за рубежом, применяются стали А387Gr11CL2, А387Gr12CL2 и др. Этому способствует выгодное сочетание комплекса высоких механических характеристик при повышенных температурах (прочности и пластичности), жаростойкости, высокого коэффициента теплопроводности с умеренной стоимостью и доступностью. Проблема недостаточно высокой коррозионной стойкости решается применением биметаллических материалов. В ходе эксплуатации РЗК возникает необходимость проведения ремонта с применением сварки для устранения растрескивания сварных соединений корпуса или замены деформированных частей

корпуса. Основной проблемой при использовании хромомолибденовых сталей является склонность к образованию трещин при проведении сварки.

В качестве примера можно привести данные по эксплуатации РЗК одного из нефтеперерабатывающих предприятий. РЗК представляет собой цельносварной пустотелый цилиндрический сосуд с верхним полусферическим и нижним коническим днищем. Цилиндрический корпус изготовлен из нескольких частей с различными толщинами стенок (42, 40, 38 мм). Каждая из этих частей собирается из двух обечаек одинаковой толщины. Материальное исполнение сосуда – отечественная двухслойная сталь 12ХМ + 08Х13.

На рис. 1 и 2 показаны вид и места дефектов в виде растрескивания, выявленных в ходе технического диагностирования 2019 г. с наружной и внутренней стороны сосуда. Значительное количество и протяженность дефектов создает большие трудности в ходе ремонта и он проводится в ограниченном объеме с устранением только наиболее крупных дефектов.

а)



б)

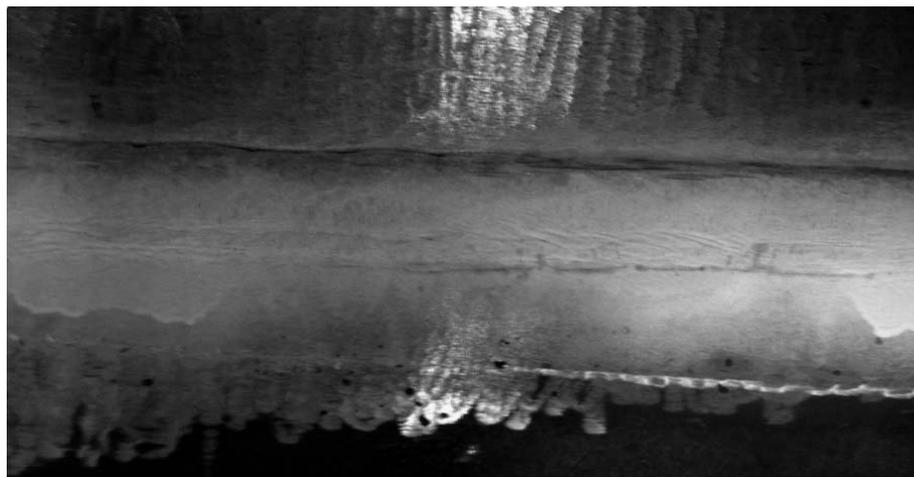


Рис. 1. Несквозные трещины по линии сплавления с нижней и верхней стороны кольцевого сварного шва корпуса, выявленные капиллярной дефектоскопией с наружной (а) и внутренней (б) стороны сосуда

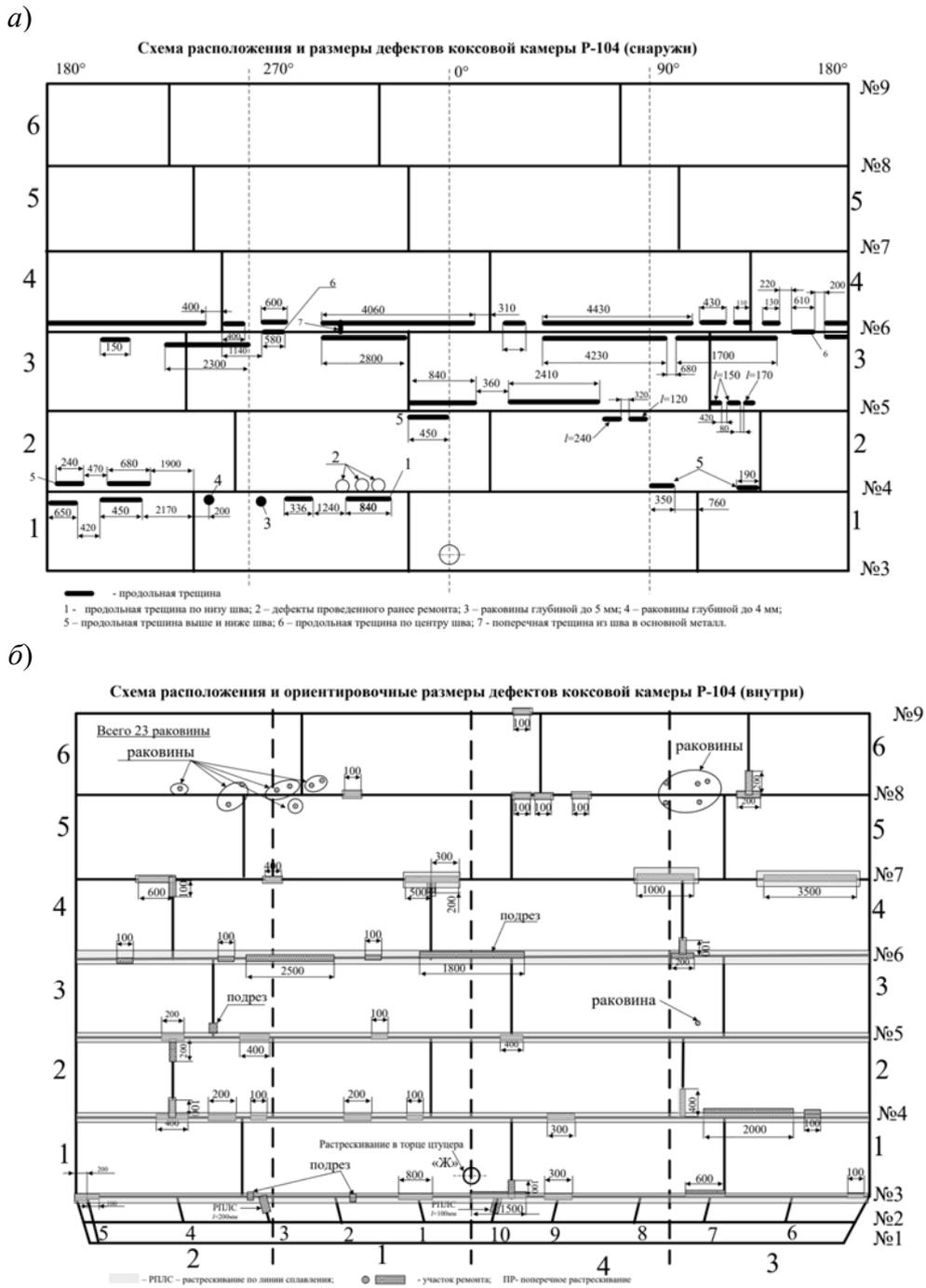


Рис. 2. Схема расположения дефектов в сварных швах корпуса коксовой камеры Р-104 с наружной (*a*) и внутренней (*б*) стороны

Организация проведения ремонта РЗК. Преодоление данной проблемы возможно двумя путями, как за счет процедуры сварки с использованием предварительной и последующей термической обработки (перлитный вариант сварки), так и разработки технологии сварки неаустенитных сталей аустенитными швами (аустенитный вариант сварки). В последнем случае использование аустенитных сварочных материалов позволяет за счет ограничения зоны подкалки только основным металлом значительно снизить общий уровень механической неоднородности в корпусе сосуда и тем самым исключить необходимость предварительного подогрева и последующей термической обработки.

Проведение операций термической обработки на корпусах РЗК в производственных условиях сильно затруднено и потому аустенитный вариант сварки в настоящее время широко используется при необходимости оперативного устранения дефектов на корпусах РЗК из хромомолибденовых сталей.

Проблемы применения аустенитного варианта сварки. Технические требования к такому варианту сварки определялись на основе НТД, определяющего требования к проведению сварки разнородных сварных соединений [1]. Технические требования при проведении соединения сваркой частей сосудов из разнородных сталей принимаются в качестве технических требований аустенитного варианта сварки для ремонта сосуда из теплоустойчивой стали одной марки. Это имеет недостаток в том, что затрудняется накопление опыта применения такого варианта сварки. Целесообразна разработка специализированного документа, определяющего технические требования к проведению ремонтной сварки по аустенитному варианту сосудов и аппаратов из хромомолибденовых сталей.

Учет внутренних напряжений в разнородных сварных соединениях. Разнородные сварные соединения характеризуются наличием внутренних напряжений вследствие разности коэффициентов линейного расширения основного металла и металла сварных швов [2]. До настоящего времени не проводятся численные оценки таких внутренних напряжений. В [3–5] предложен подход к оценке величины касательных (сдвиговых) напряжений разнородных сварных соединений на основе оценки общего уровня напряжений сжатия в материале сварного шва от стесненности температурного удлинения с момента сварки в процессе охлаждения до выбранной температуры. Данный подход представляется отражающим физическую картину в процессе сварки с момента застывания жидкого металла и охлаждения с физическим явлением образования «холодных трещин». Оценка внутренних напряжений в материале сварного шва от стесненности температурной деформации с момента сварки в процессе охлаждения до выбранной температуры проводится по формуле

$$\sigma^t = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^c \cdot E_i^c - \alpha_i^o \cdot E_i^o),$$

где n – число интервалов разбиения; t – расчетная температура, температура, до которой производится охлаждение сварного соединения после сварки, °С; α_i^c , α_i^o – коэффициенты температурного линейного расширения металла шва и основного металла для i -го температурного интервала; E_i^c , E_i^o – модули продольной упругости металла сварного шва и основного материала для i -го температурного интервала.

Величина касательных напряжений, действующих по линиям сплавления сварных швов, при расчетной температуре t определится по формуле

$$\tau^t = \sigma^t \cdot k,$$

где k – расчетный коэффициент учета фактической геометрии сварного соединения (угла наклона линий сплавления, относительного количества наплавленного металла и др.).

Пример результатов расчетов показан на рис. 3. Как видно, применение электродных материалов с малой и средней степенью легирования никелем

вызывает значительные внутренние касательные напряжения, что способствует возникновению повреждений в виде растрескивания по линиям плавления.

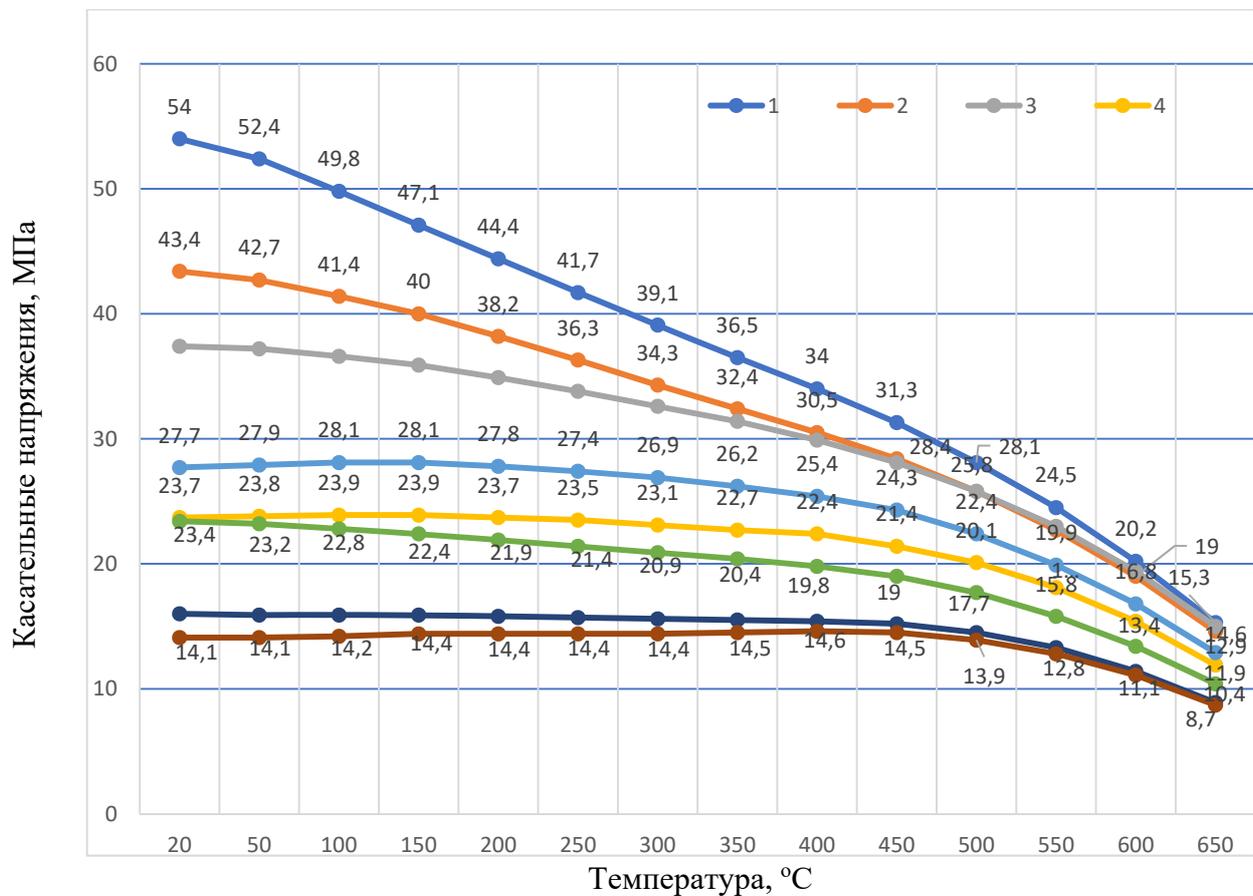


Рис. 3. Результаты расчета внутренних касательных напряжений в разнородных сварных соединениях для стали 15X5M с различным материальным исполнением металла шва в зависимости от температуры: 1 – ОЗЛ-6; 2 – АНЖР-2; 3 – АНЖР-1; 4 – ХН70; 5, 6 – ХН75МБТЮ; 7, 8 – ХН78Т

Повышение работоспособности разнородных сварных соединений.

Основная рекомендация состоит в расширении применения сварочных материалов с высоким содержанием никеля. Коэффициенты линейного расширения сплавов на основе никеля и теплоустойчивых сталей (15X5M, 12XM и др.) имеют близкие значения, что позволяет снизить внутренние напряжения в сварном соединении. В существующих НТД отсутствуют четкие указания по применению высоконикелевых электродных материалов. Согласно [1] для применения допускаются электродные материалы с различной степенью легирования никелем, например ОЗЛ-6 с содержанием никеля 13 % масс. Говорится, что «для сварки разнородных соединений, включающих теплоустойчивые стали и эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание, допускается применять аустенитные сварочные материалы, содержащие не менее 40 % никеля». В научно-технической литературе фактор коррозионного растрескивания как причина повреждения РЗК не рассматривается. Поэтому в разрабатываемых технологиях сварки по аустенитному варианту на предприятиях обычно указывается применение материалов с малым и средним содер-

жанием никеля. Для обеспечения работоспособности разнородных сварных соединений необходимо указание применения исключительно высоконикелевых электродных материалов. Широко используемый за рубежом документ [6] рекомендует применение высоконикелевых электродных материалов при проведении ремонта РЗК.

Результат применения рекомендаций. В разработанной инструкции [7] отражены изменения в технологии сварки теплоустойчивых сталей по аустенитному варианту. Для предотвращения растрескиваний указывается применение исключительно высоконикелевых электродных материалов с содержанием никеля не менее 60 % масс. Практика показала возможность обеспечения высокой работоспособности РЗК в условиях интенсивного растрескивания сварных соединений. Применение описанной технологии ремонта позволило исключить образование «холодных трещин» при проведении ремонтной сварки РЗК в условиях низких зимних температур. С 2020 г. проходит успешная эксплуатация РЗК на одном из нефтеперерабатывающих предприятий, число рабочих циклов каждого из четырех реакторов превысило 400. Выявляемые растрескивания сварных соединений подвергаются ремонту по аустенитному варианту. Это показывает возможность применения аустенитного варианта сварки для оборудования из сталей, склонных к подкалке, эксплуатируемого в условиях высокотемпературного циклического нагружения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт организации. Сварка разнородных соединений сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах: СТО 00220368-011–2007. – Волгоград: ВНИИПТхимнефтеаппаратуры, 2007.
2. Welding Guidelines for the chemical, oil and gas industries (downstream segment). API Recommended Practice 582. First edition, March 2001.
3. **Бадьин, Ю. А.** Исследование причин повреждения аустенитных сварных соединений змеевиков нефтезаводского оборудования / Ю. А. Бадьин // Нефтегазовое дело. – 2021. – № 5. – С. 170–182.
4. **Бадьин, Ю. А.** Повреждение аустенитных сварных соединений трубопроводов вследствие фазового расслоения нагретой среды / Ю. А. Бадьин // Нефтегазовое дело. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 151–164.
5. **Бадьин, Ю. А.** Предотвращение растрескивания аустенитных сварных соединений трубопроводов из теплоустойчивых сталей / Ю. А. Бадьин // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 2. – С. 155–166.
6. API TR 934-G–2016. Design, Fabrication, Operational Effects, Inspection, Assessment, and Repair of Coke Drums and Peripheral Components in Delayed Coking Units. – Washington: American Petroleum Institute, 2016. – 57 p.
7. Технологическая инструкция ремонта трещин в основном металле и металле сварных соединений корпусов реакторов установок замедленного коксования аустенитными сварочными материалами. – Волгоград: ВНИКТИнефтехимоборудование, 2020.

E-mail: yuabadin@vnikti.rosneft.ru.

УДК 621.791

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СВАРОЧНОГО ТОКА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

С. В. БОЛОТОВ, В. П. КУЛИКОВ, Е. Д. КУКУШКИН, П. А. РЕЕНТОВИЧ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791

METHODOLOGY FOR CALCULATION OF WELDING CURRENT AND CONTROL OF CONTACT RELIEF WELDING OF OVERLAPPING JOINTS

S. V. BOLOTOV, V. P. KULIKOV, E. D. KUKUSHKIN, P. A. REENTOVICH

Аннотация. Разработаны методика и программно-аппаратные средства для расчета сварочного тока и управления процессом контактной рельефной сварки нахлесточных соединений с учетом полученных выражений, описывающих границу сварной точки для разных толщин свариваемых деталей и размеров рельефа, с учетом энергии теплоотвода в основной металл и материал электродов при изменяющихся теплофизических свойствах в процессе нагрева.

Ключевые слова: контактная рельефная сварка, сварочный ток, энергия теплоотвода, сварная точка, управление.

Abstract. A technique and software and hardware tools have been developed for calculating the welding current and controlling the process of resistance relief welding of lap joints, taking into account the expressions obtained that describe the boundary of the weld point for different thicknesses of the welded parts and relief sizes, taking into account the energy of heat removal to the base metal and electrode material with changing thermophysical properties during heating.

Keywords: resistance relief welding, welding current, heat removal energy, spot welding, control.

Для расчета параметров режима при контактной рельефной сварке нахлесточных соединений используют уравнение теплового баланса, которое изначально предназначалось для контактной точечной сварки. При этом определяют электрическую энергию $Q_{\text{ЭЭ}}$, которую необходимо ввести в межэлектродную зону для формирования сварной точки требуемых размеров [1]:

$$Q_{\text{ЭЭ}} = Q_{\text{П}} + Q_{\text{М}} + Q_{\text{Э}} + Q_{\text{К}},$$

где $Q_{\text{П}}$ – полезная энергия, затрачиваемая на получение зоны взаимного расплавления металла свариваемых деталей; $Q_{\text{М}}$ – энергия, затрачиваемая на

теплоотвод в основной металл свариваемых деталей; Q_3 – энергия, затрачиваемая на теплоотвод в электроды; Q_K – энергия, затрачиваемая на конвективный теплообмен металла с окружающей средой.

При расчете Q_{II} принимают, что полезная энергия выделяется в столбике металла под электродами. В ходе экспериментальных исследований установлено, что зона взаимного расплавления свариваемых деталей при контактной рельефной сварке нахлесточных соединений имеет форму объемного эллипсоида (рис. 1).

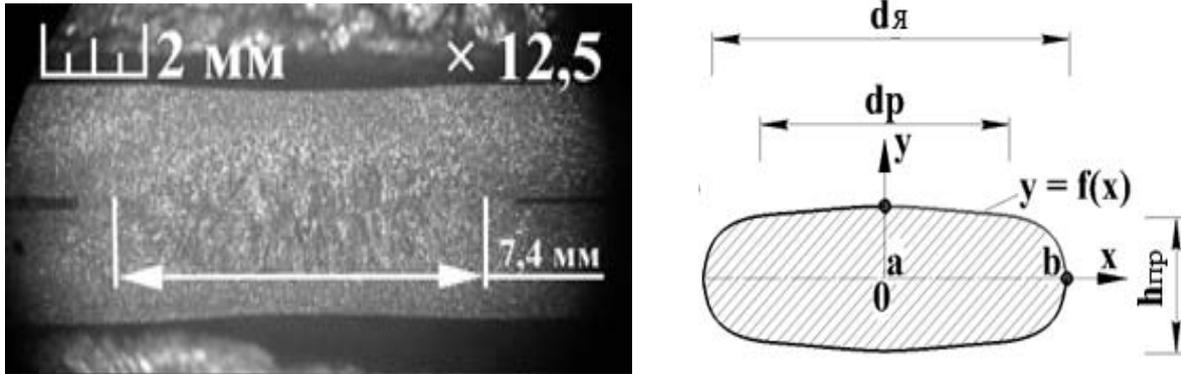


Рис. 1. Макрошлиф и форма поперечного сечения литой зоны сварного соединения

Функция кривой $y = f(x)$, описывающей четверть границы литой зоны для представленного на рис. 1 макрошлифа, имеет вид:

$$y = - 5,183681 - 3,159326x + 9,9734506x^{0,5} + 5,0125315e^{-x}.$$

Тогда, учитывая теплофизические свойства материала свариваемых деталей: удельную теплоемкость c_M , плотность металла γ_M и температуру плавления $T_{ПЛ}$ для заданной глубины проплавления деталей $h_{ПР}$, полезная энергия будет определяться как

$$Q_{II} = 2\pi \int_0^{h_{ПР}} f^2(x) dx c_M \gamma_M T_{ПЛ}.$$

Учет реальной геометрии литой зоны для различных толщин свариваемых деталей и размеров рельефа позволяет уменьшить количество энергии, расходуемой на расплавление соединяемых деталей при обеспечении требуемой прочности сварного соединения.

Получены зависимости, позволяющие определить реальную энергию Q_M , затрачиваемую на теплоотвод в основной металл свариваемых деталей, и энергию Q_3 , затрачиваемую на теплоотвод в электроды (рис. 2).

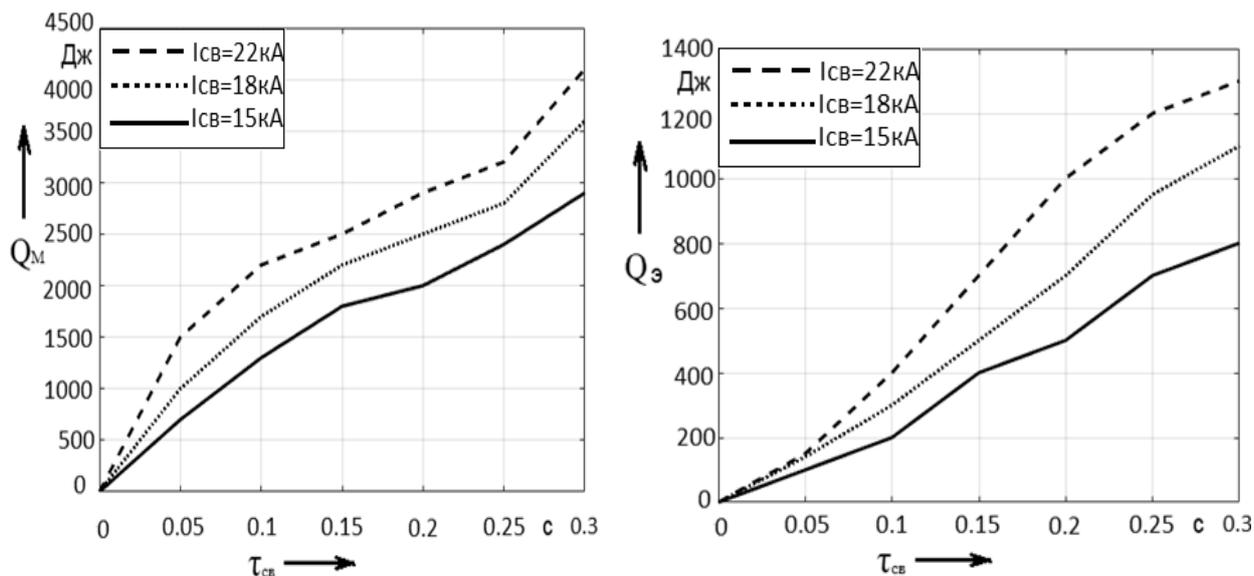


Рис. 2. Зависимость энергии, затрачиваемой на теплоотвод в основной металл свариваемых деталей, Q_M и энергии, затрачиваемой на теплоотвод в электроды, $Q_{\text{Э}}$ от времени сварки τ_{CB} для различных значений сварочного тока I_{CB} для пластин толщиной 2 + 2 мм по рельефу габаритами 6 × 1,2 мм

Разработана методика расчета сварочного тока в программной среде LabVIEW с учетом полученных выражений, описывающих границу сварной точки для разных толщин свариваемых деталей и размеров рельефа, с учетом энергии теплоотвода в основной металл и материал электродов при изменяющихся теплофизических свойствах в процессе нагрева, которая включает следующие этапы.

1. Выбор программой значения длительности протекания импульса тока τ_{CB} для задаваемого материала свариваемых деталей, толщины, размеров рельефа.

2. Определение требуемых из соображений прочности геометрических размеров сварной точки (диаметр ядра d_j и глубина проплавления h_{np}) и функции $y = f(x)$, описывающей границу литой зоны.

3. Определение энергии теплоотвода в основной металл Q_M и материал электродов $Q_{\text{Э}}$ с учетом их изменяющихся теплофизических свойств в процессе нагрева.

4. Расчет энергии $Q_{\text{ЭЭ}}$, необходимой для ввода в межэлектродную зону, по уравнению теплового баланса [1].

5. Выбор значения усилия сжатия электродов F_{CB} по графику эмпирической зависимости $Q_{\text{ЭЭ}} = f(F_{CB})$, установленной ранее [2].

6. Определение значения сопротивления межэлектродной зоны $R_{\text{ЭЭ}}$ по графику зависимости $R_{\text{ЭЭ}} = f(F_{CB})$ для данного материала и толщины свариваемых деталей [2].

7. Расчет требуемой величины сварочного тока I_{CB} по закону Джоуля – Ленца в соответствии с принятым значением длительности протекания импульса τ_{CB} , расчетным значением вводимой в межэлектродную зону энергии $Q_{ЭЭ}$ и определенным значением сопротивления этой зоны $R_{ЭЭ}$ [3].

8. Установка напряжения управления U_U для блока управления установки для контактной рельефной сварки, соответствующего рассчитанной величине сварочного тока I_{CB} (рис. 3).

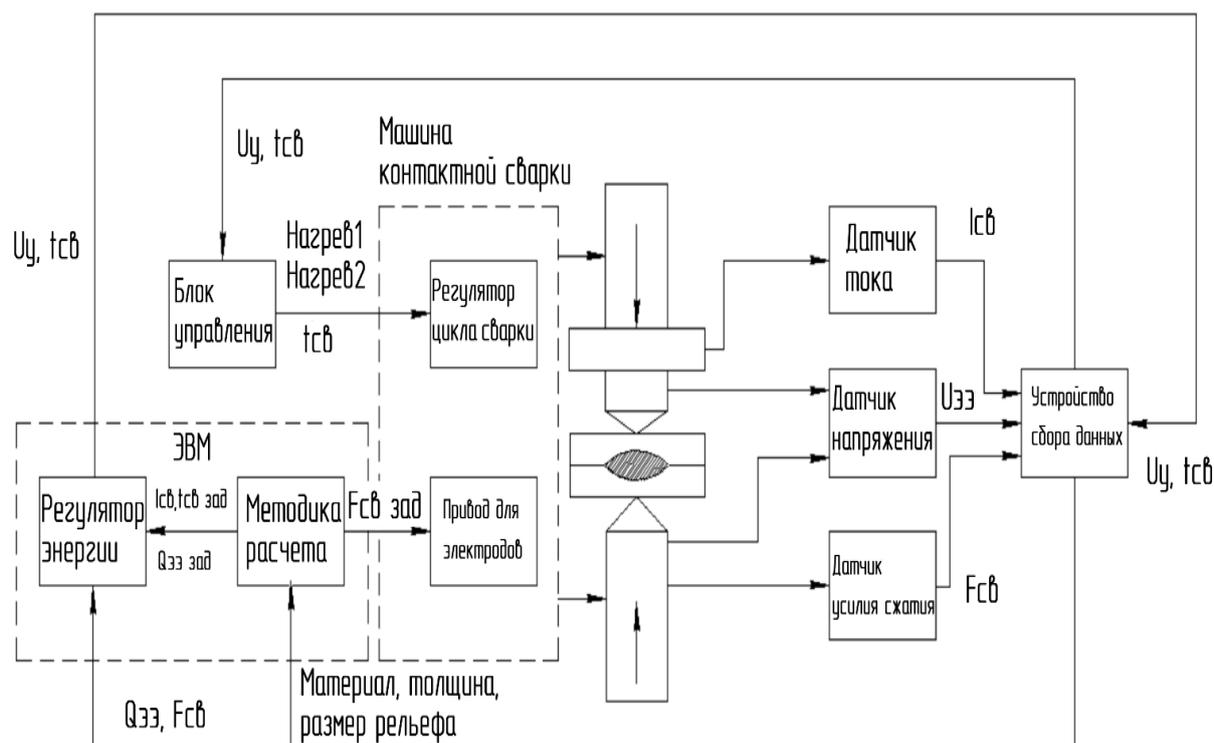


Рис. 3. Структурная схема установки для контактной рельефной сварки

9. Контроль в процессе сварки системой программного управления на базе ЭВМ сварочного тока i_{cb} , напряжения между электродами $u_{ээ}$, усилия сжатия электродов F_{cb} (рис. 4).

10. Определение энергии, вводимой в межэлектродную зону:

$$Q_{ЭЭ} = i_{cb} \cdot u_{ээ} \cdot \Delta t.$$

11. Корректировка напряжения управления U_U .

12. При достижении энергии $Q_{ЭЭ}$ заданного значения $Q_{ЭЭ \text{ зад}}$ производится подача сигнала с цифрового выхода устройства сбора данных через блок управления на регулятор цикла сварки РКС-801 для отключения сварочного тока. Процесс сварки завершается.

Программное обеспечение системы управления реализовано в среде графического программирования NI LabVIEW [4].

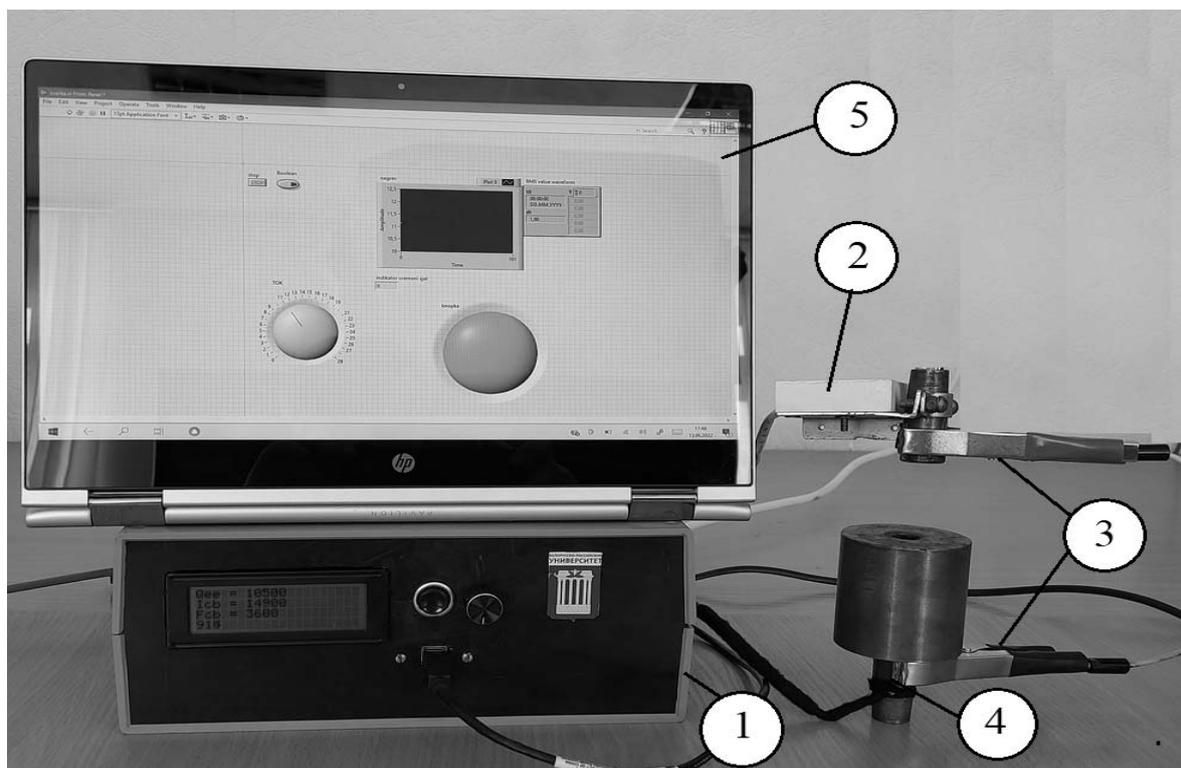


Рис. 4. Внешний вид системы программного управления машиной контактной сварки: 1 – блок управления; 2 – датчик тока; 3 – датчик напряжения между электродами; 4 – датчик усилия сжатия электродов; 5 – ЭВМ

Разработанная методика расчета и управления сварочным током позволяет использовать энергосберегающие режимы контактной рельефной сварки нахлесточных соединений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поляков, А. Ю.** Снижение энергоемкости процессов контактной рельефной сварки: монография / А. Ю. Поляков. – 2-е изд., доп. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 216 с.

2. **Поляков, А. Ю.** Влияние усилия сжатия электродов на величину вводимой энергии при контактной рельефной сварке с расплавлением / А. Ю. Поляков, А. О. Коротеев, С. В. Болотов // Сварочное производство. – 2022. – № 1. – С. 16–22.

3. Методика расчета основных параметров режима контактной рельефной сварки с автоматической корректировкой мощности тепловложения / С. В. Болотов [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–22 апр. 2022 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 180.

4. **Реентович, П. А.** Разработка программного обеспечения для реализации методики расчета основных параметров режима контактной рельефной сварки Т-образных соединений / П. А. Реентович, Е. Д. Кукушкин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 100.

E-mail: s.v.bolotov@mail.ru.

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

А. Л. ГОНЧАРОВ, В. К. ДРАГУНОВ, А. П. СЛИВА, И. С. ЧУЛКОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 621.791

THERMOELECTRIC EFFECT AND ITS INFLUENCE ON THE ELECTRON BEAM DURING WELDING OF DISSIMILAR STEELS INVESTIGATION

A. L. GONCHAROV, V. K. DRAGUNOV, A. P. SLIVA, I. S. CHULKOV

Аннотация. Приведены результаты исследований магнитных и термоэлектрических свойств трех марок конструкционных сталей различных структурных классов. Получены экспериментальные и расчетные данные изменения магнитной индукции в процессе электронно-лучевой сварки разнородных сталей. Рассчитана форма отклоненного электронного пучка в магнитном поле термоэлектрических токов. Рассчитанные значения отклонений сравниваются с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: разнородные стали, электронно-лучевая сварка, магнитные поля, термоэлектрический эффект, электронный пучок.

Abstract. The results of the magnetic and thermoelectric properties studies for three grades of structural steels of various structural classes are presented. Experimental and calculated data on magnetic induction changes during electron-beam welding of dissimilar steels are obtained. The shape of the deflected electron beam in the magnetic field of thermoelectric currents is calculated. The calculated values of the deviations are compared with the experimental results.

Keywords: dissimilar steels, electron beam welding, magnetic fields, thermoelectric effect, electron beam.

Введение. Процесс электронно-лучевой сварки характеризуется большим числом физических явлений, происходящих при взаимодействии ускоренного электронного пучка с материалом, а именно тепловых, деформационных, гидродинамических и плазменных. Большинство из этих процессов связаны между собой, более того, возникающие физические поля в ответ влияют на инструмент обработки – электронный пучок.

В процессе сварки разнородных материалов наибольшее влияние на электронный пучок оказывают магнитные поля, образующиеся в результате термоэлектрических токов [1, 2]. Таким образом, существующее многообразие физических процессов может быть дополнено термоэлектрическими явлениями, которые при определенных условиях становятся решающими в формировании качественного сварного соединения. Отклонение луча, вызванное магнитным полем термоэлектрических токов, может приводить к дефекту в виде непровара по глубине стыка.

Значение магнитной индукции термоэлектрического тока определяется рядом факторов, включая распределение температуры в зоне сварки, размеры свариваемой детали, а также электрическое сопротивление, магнитную проницаемость и термоЭДС соединяемых материалов.

Разработан ряд математических моделей термоэлектрических явлений в электронно-лучевой сварке для прогнозирования отклонения электронного пучка от стыка [1, 2]. Однако допущения, сделанные в существующих моделях, вызывают значительные ограничения в их применимости, а сами модели недостаточно проверены. Отсутствуют данные о значениях термоэлектрических и магнитных свойств для большинства марок конструкционных материалов.

Цель работы заключалась в изучении распределения магнитного поля токов термоЭДС при электронно-лучевой сварке и его связи с отклонением электронного пучка при сварке разнородных сталей.

Методы исследования. С помощью термопар получены температурные зависимости термоЭДС для различных сталей трех структурных классов. Температурную зависимость термоЭДС определяли интегральным методом на термопарах из исследуемых материалов, в которых одна из ветвей изготавливалась из хромеля (табл. 1). Температурный градиент обеспечивали путем помещения исследуемой термопары в высокотемпературную печь.

Табл. 1. Химический состав исследуемых сталей

Материал	Химический состав, %					Класс	Термо-ЭДС при 800 °С
	С	Cr	Ni	Mo/V	Mn/Si		
12X18H10T	< 0,12	17...19	9...11	–	< 2 / < 0,8	А	–2,18
20X13	0,16...0,25	12...14	< 0,6	–	< 0,6 / < 0,7	М + Ф	7,71
09Г2С	< 0,12	< 0,3	< 0,2	– / < 0,12	1,3...1,7 / 0,5...0,8	П	–0,25

ТермоЭДС измеряли вольтметром В7-22 при нагревании горячего спая в диапазоне температур 50 °С...1100 °С. Далее относительный коэффициент термоЭДС для пар проводников вычисляли из выражения

$$S_r = \frac{dE_r}{dT}, \quad (1)$$

где E_r – измеренная относительная термоЭДС.

Затем был рассчитан абсолютный коэффициент термоЭДС:

$$S_{abs} = S_r - S_{chr}, \quad (2)$$

где S_{chr} – коэффициент термоЭДС для хромеля.

Для получения кривых намагниченности использовали комбинированный прибор Remagraph-Remagraph, состоящий из двух флюксометров EF5. Для получения кривой намагничивания для каждого исследуемого материала было изготовлено по три образца сечением 10 × 10 мм (±0,02 мм); длина образца составляла 120 мм. Перед измерениями каждый из образцов размагничивали в переменном магнитном поле с уменьшающейся амплитудой. Затем для каждого

из образцов была получена кривая намагниченности. Электронно-лучевая сварка характеризуется малыми значениями индукции магнитного поля, индуцированной термоэлектрическим током, поэтому для дальнейшего анализа она была ограничена значением 100 мТл.

На основе полученных данных о термоэлектрических и магнитных свойствах создана улучшенная численная модель термоэлектрических явлений при ЭЛС разнородных материалов.

Модель состоит из четырех подмоделей: тепловая задача, электрическая задача, магнитная задача и траекторная задача. Тепловая задача решена на основе нестационарного теплового уравнения

$$c(T)\rho(T)\vec{V} \cdot \nabla T = \nabla(\lambda(T)\nabla T) + Q(x, y, z), \quad (3)$$

где $c(T)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность материала, кг/м³; $\lambda(T)$ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); $Q(x, y, z)$ – объемный источник тепла, Вт/м³.

Источником тепла при ЭЛС является парогазовый канал, который в модели был описан в форме цилиндра. Тогда действие объемного источника может быть задано как граничное условие на цилиндрической границе парогазового канала с радиусом r_k в виде удельного теплового потока $q_b(x, y, z)$.

Полученное распределение температуры при сварке было использовано для решения электрической задачи, которая была сформулирована как закон Ома в дифференциальной форме.

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} + \vec{j}_e, \quad (4)$$

где $\vec{j}_e = -\sigma S \nabla T$; \vec{j} – вектор плотности термоэлектрического тока; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; σ – проводимость материала, С/м; S – термоэлектрический коэффициент, В/К.

Магнитную задачу решали нахождением векторного потенциала \vec{A} с последующим вычислением индукции магнитного поля токов термоЭДС \vec{B} :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu(T)\mu_0} \nabla \cdot \vec{A} \right) = \vec{j}; \quad (5)$$

$$\vec{B} = \nabla \cdot \vec{A}. \quad (6)$$

В расчетах учитывалось формирование парамагнитной зоны в области канала проплавления. Для этого была задана зависимость магнитной проницаемости в виде

$$\mu(T) = \mu_m(1 - h(T - T_c)), \quad (7)$$

где μ_m – магнитная проницаемость материала при комнатной температуре; T_c – температура Кюри; $h(x)$ – функция Хевисайда.

И, наконец, для полученного распределения магнитной индукции была решена траекторная задача движения заряженной частицы (электрона) в стационарном магнитном поле:

$$\frac{d^2x}{dz^2} + \sqrt{\frac{2e}{mU}} B_z(x, y, z) \frac{dy}{dz} = \sqrt{\frac{2e}{mU}} B_y(x, y, z); \quad (8)$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} - \sqrt{\frac{2e}{mU}} B_z(x, y, z) \frac{dx}{dz} = -\sqrt{\frac{2e}{mU}} B_x(x, y, z), \quad (9)$$

где $x(z)$, $y(z)$ – траектории электронов в плоскостях XOZ и YOZ соответственно; $B_x(x, y, z)$, $B_y(x, y, z)$, $B_z(x, y, z)$ – проекции вектора магнитной индукции на соответствующие координатные оси; U – ускоряющее напряжение в электронной пушке.

Из-за сложности разрабатываемых численных моделей их проверка должна осуществляться по нескольким параметрам. Помимо оценки траектории электронного пучка, перспективной и осуществимой является оценка индукции магнитного поля. На рис. 1 показана схема измерения магнитного поля в сварных образцах.

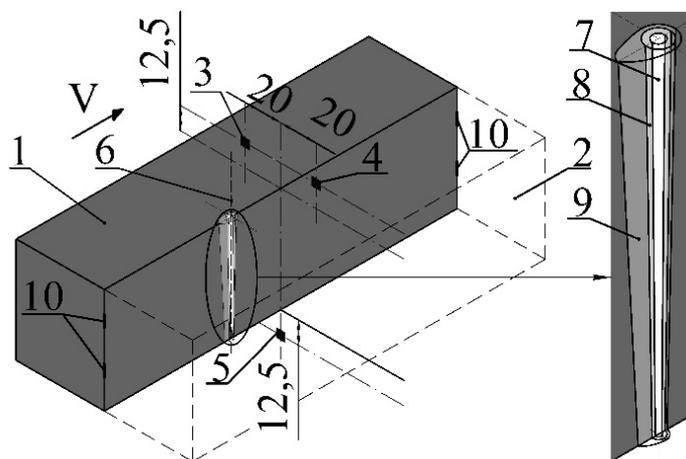


Рис. 1. Схема измерения индукции магнитного поля при ЭЛС разнородных материалов: 1, 2 – свариваемые образцы; 3, 4 – датчики магнитной индукции над поверхностью образцов; 5 – датчик магнитной индукции в корне сварного шва; 6 – ось электронного пучка; 7 – электронный пучок в канале проплавления; 8 – парогазовый канал; 9 – сварочная ванна; 10 – прихваточные сварные швы

Результаты исследований. На рис. 2 показаны экспериментальные значения термоэлектрических (см. рис. 2, а) и магнитных (см. рис. 2, б) свойств исследуемых сталей, определенные в ходе эксперимента.

Индукция магнитного поля, измеренная в процессе ЭЛС для образца из сталей 12X18H10T + 20X13, показана на рис. 3. Максимальное значение

индукции магнитного поля достигает значения 0,89 мТл в корне сварного шва (датчик поз. 5 на рис. 3) и значения 0,77 мТл над образцом из 20Х13 (датчик поз. 3 на рис. 3). Отклонение электронного пучка происходит в сторону стали 20Х13, увеличиваясь с 1,8 мм в начале сварного шва, достигая 3,8 мм в его середине и уменьшаясь до 1,6 мм в конце сварного шва (рис. 4). Расчетные значения индукции в корне шва и над поверхностью стали 20Х13 составляют 0,98 и 0,83 мТл соответственно.

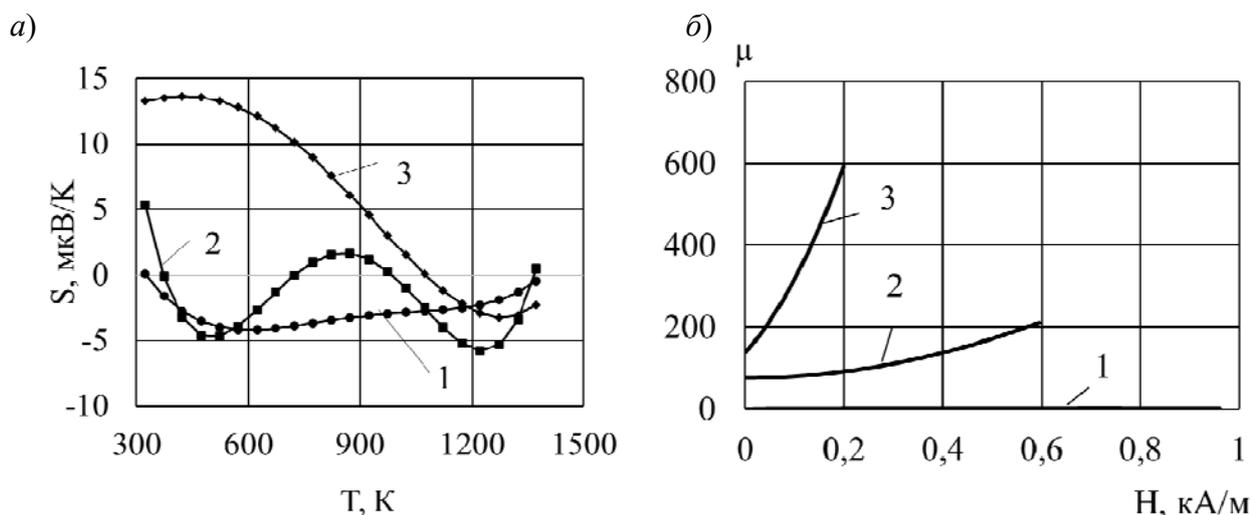


Рис. 2. Экспериментальные зависимости абсолютного коэффициента термоЭДС (а) от температуры и магнитной проницаемости (б) от напряженности магнитного поля

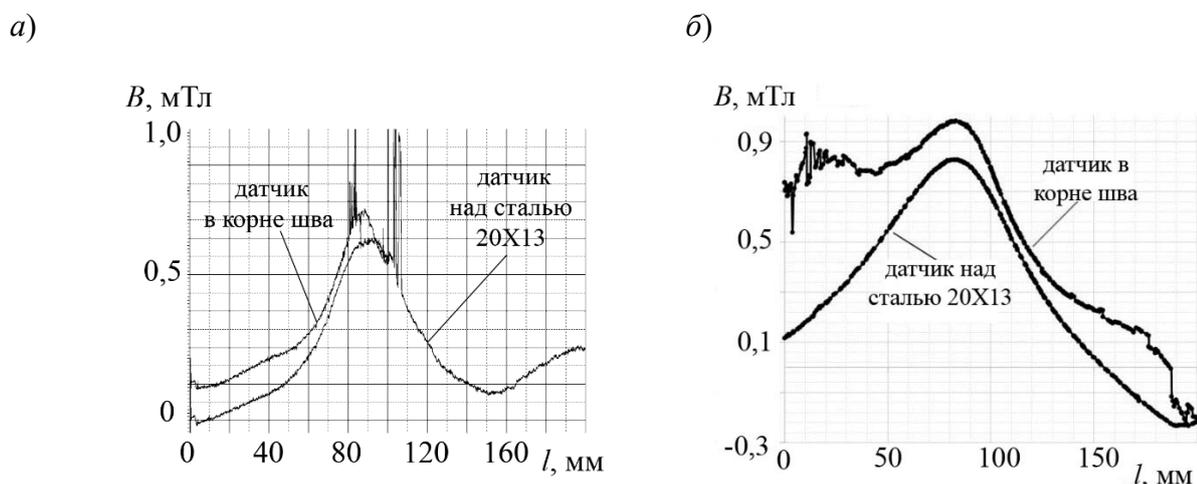


Рис. 3. Экспериментальные (а) и численные (б) значения индукции магнитного поля термоэлектрических токов при ЭЛС сталей 12Х18Н10Т и 20Х13

Во время ЭЛС образцов из сталей 20Х13 и 09Г2С максимальные значения индукции магнитного поля составили 0,54 и 0,47 мТл над сталью 20Х13 и 09Г2С соответственно. Измерения в корне шва не проводились. Отклонение электронного пучка в корне сварного шва (см. рис. 4) также изменяется неравномерно по длине сварного шва с 2,1 мм в начале и конце сварного шва и достигает максимума в 2,8 мм в его середине. В математической модели индукция

магнитного поля над образцом из стали 09Г2С и стали 20Х13 рассчитана на уровне 0,51 и 0,58 мТл соответственно.

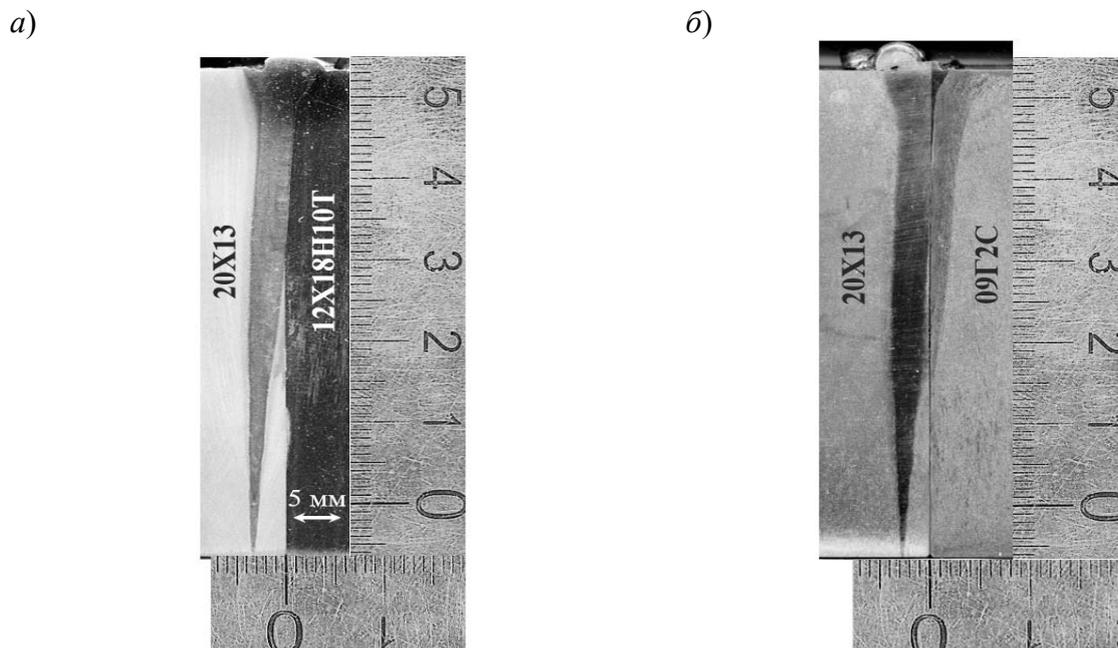


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений разнородных сталей 12Х18Н10Т + 20Х13 (а) и 09Г2С + 20Х13 (б) толщиной 60 мм, полученные ЭЛС

Выводы. Индукция магнитного поля в численной и физической моделях показывает хорошее совпадение, кроме того, совпадение показывают полученные значения отклонения электронного пучка. Таким образом, применяемая численная модель была верифицирована в двух подмоделях – магнитной и траекторной. Отклонение электронного пучка при сварке пары сталей 12Х18Н10Т + 20Х13 оказалось больше в сравнении с отклонением при сварке 09Г2С + 20Х13, что объясняется большей разницей в значениях термоЭДС для первой пары сталей и подтверждается большими зафиксированными значениями индукции магнитного поля в эксперименте.

Работы выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF – 2020-0023).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wei, P. S.** Electron beam deflection when welding dissimilar metals / P. S. Wei, T. W. Lii // Journal of Heat Transfer. – 1990. – № 112 (3). – P. 714–720.
2. **Драгунов, В. К.** Пространственные параметры электронного пучка при взаимодействии с намагниченной мишенью / В. К. Драгунов, А. Л. Гончаров, А. П. Слива // Сварочное производство. – 2008. – № 12. – С. 20–24.

E-mail: GoncharovAL@mpei.ru.

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ «ГОДЕН – НЕГОДЕН» И КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Л. С. ДЕНИСОВ

ОО «Белорусское инженерное общество»

Минск, Беларусь

UDC 621.791

RESEARCH OF THE PRESENT «FIT OR NOT FIT» CONTROL SYSTEM AND THE QUALITY OF WELDED JOINTS

L. S. DENISOV

Аннотация. Рассмотрены исследования действующей на предприятиях системы контроля «Годен – негоден». Приводятся конкретные результаты выявленной дефектности и расчетные уровни качества. Определяются причины брака.

Ключевые слова: сварное соединение, дефекты и причины их образования.

Abstract. The paper examines the studies of the «Fit – not fit» control system operating at enterprises, provides specific results of the identified defects and calculated quality levels. The reasons for the marriage are determined.

Keywords: welded joint, defects and causes of their formation.

*«... Качество вряд ли имеет
достижимые пределы, тогда
как количество природных
богатств и производственных
ресурсов, несомненно, ограничено...»*

Мы живем в сложный и трудный период истории: COVID-19, длительная стагнация, отсутствие инвестиций для развития сварочного дела, отток специалистов-сварщиков за рубеж, тяжелые демографические условия и т. д. и т. п. затрудняют развитие сварочного производства в Республике Беларусь.

В этих условиях, для сохранения действующих сварочных производств от деградации и достижения высокого технического уровня в обеспечении качества сварных соединений металлоконструкций и надежности при эксплуатации, необходимы новые подходы, новые эффективные методы и средства при изготовлении высокоответственной и ответственной сварочной продукции.

Для решения данной задачи Научно-производственная (НП) секция «Сварка и родственные технологии» и ведущие ученые кафедры сварки Белорусско-Российского университета, работают в постоянном поиске путей сохранения и развития сварочного производства в сложных условиях современного периода. Это очень важно! Известно: «там, где выполняются надежные соединения

механизмов, разнообразных устройств, сооружений и т. д., государства добиваются высокого прогресса в машиностроении и других областях».

За многолетние годы работы по данной проблеме НП секцией «Сварка и родственные технологии» изучены условия и действующие факторы сварочного производства, накоплен опыт и разработаны новые эффективные и низкзатратные пути: способы формирования требуемого качества сварочной продукции и сварных соединений (СвС). В основе этих работ предлагается новая парадигма развития сварочного производства (СП).

Анализ действующего контроля по схеме «Годен – негоден» и его сравнение с Управляющим контролем процессами сварки и качества (рис. 1).

Фактические данные об объекте сварки и контроля	
Обеспечение качества СвС при контроле по схеме «ГнГ»	Обеспечение качества СвС при Управляющем контроле «УК ПСК»
1	2
<ol style="list-style-type: none"> 1. Проектная документация на изделие (сооружение) и сварные соединения. 2. Исполнители (сварщики, сборщики, ИТР), их квалификация и допуски. 3. Сварочные материалы, сварочное оборудование, оснастка, документация. 4. Способы сварки № 111, 135, 141 и др. 5. Технологическая инструкция (WPS, ППСР и др.) на сварку и контроль. 6. Методы контроля качества сварных соединений (СвС), НМК, РМК и др. 7. Требования к качеству СвР и СвС согласно ТНПА. Анализ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Проектная документация на изделие (сооружение) и сварные соединения. 2. Исполнители (сварщики, сборщики, ИТР), их квалификация и допуски. 3. Сварочные материалы, сварочное оборудование, оснастка, документация. 4. Способы сварки № 111, 135, 141 и др. 5. Технологическая инструкция (WPS, ППСР и др.) на сварку и контроль. 6. Методы контроля качества сварных соединений (СвС), НМК, РМК и др. 7. Требования к качеству СвР и СвС согласно ТНПА. Анализ
<p>Объект сварочных работ: подготовка, сборка, сварка, контроль «Годен – негоден»</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Процедуры контроля качества СвС. 2. Оценка качества СвС по ТНПА. 3. Выдача актов (протоколов) по внешнему осмотру и измерениям СвС. 4. Выдача заключений о качестве СвС по НМК, РМК и др. 5. Регистрация документов и их хранение 	<p>Объект сварочных работ: подготовка, сборка, сварка, Управляющий контроль</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Процедуры контроля качества выборки СвС по карте контроля. 2. Оценка качества СвС по ТНПА. 3. Оценка стабильности процесса сварочных работ (СвР). 4. Выдача актов (протоколов) по внешнему осмотру и измерениям СвС. 5. Выдача заключений о качестве СвС по НМК, РМК и др. Регистрация и хранение документов
Послеконтрольные операции по схеме «ГнГ»	Послеконтрольные операции при «УК»
При контроле качества СвС «Годен – негоден» послеконтрольные операции не выполняются	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сбор и учет дефектности и несоответствий. 2. Анализ дефектности. 3. Установление причин образования дефектности и брака. 4. Разработка мер по устранению причин образования дефектности и брака. 5. Отчет по качеству сварки на объекте, регистрация и хранение документов

Рис. 1. Алгоритмы подготовки и контроля по схеме «Годен – негоден» (ГнГ) и для сравнения по схеме «Управляющий контроль процессами сварки и качества» (УК ПСК)

Коротко проанализируем систему контроля, принятую на действующих предприятиях, с определением качества сварных соединений по схеме «ГнГ».

На рис. 1, столбец 1, приведен краткий алгоритм контроля сварных соединений по системе «Годен – негоден». Алгоритм и работы по контролю заканчиваются выдачей «Заключения о качестве СвС». Дальнейший ход контроля на этом и заканчивается. Однако известно, что контроль не обеспечивает качество соединений, а только отделяет годные СвС от негодных.

Как установлено, контроль по схеме «ГнГ» также не обеспечивает требования нормативов к качеству. При таком контроле мы не получаем необходимую, достоверную для оценки качества информацию. Отмечается сугубо необъективная и, как правило, с низкой достоверностью оценка качества. В лучшем случае оператор (дефектоскопист) знает количество забракованных стыков и может определить процент брака. Но не зная истоков появления (образования) дефектов и действующих на объекте факторов качества, руководитель сварочными работами *никак не может знать и причины брака, а соответственно, как их устранять???* И, что самое главное! – *решать проблему совершенствования сварочного производства (СП).*

НП секцией «Сварка и родственные технологии» выполнен обширный анализ состояния качества СвС на объектах сварки в процессе изготовления и эксплуатации различных изделий и сооружений.

На основании выполненных исследований предложена новая парадигма развития сварочного производства и повышения качества сварных соединений.

Рассмотрим результаты оценки качества и его состояния по схеме «Годен – негоден» независимыми организациями.

Как показывает практика эксплуатации, из-за различного рода дефектов сварных соединений конструкция может разрушиться задолго до окончания установленного срока ее эксплуатации.

На рис. 2 показаны «Причины разрушения сварных конструкций» по данным Международного института сварки (МИС).

Международный институт сварки в исследованиях качества сварных конструкций и сварных соединений (см. рис. 2) установил неудовлетворительное состояние проектирования – 28,8 %. Практически третья часть всех выполняемых сварных изделий имеет очень опасные дефекты с большой вероятностью разрушения в процессе их эксплуатации. Отмечаются высокий уровень дефектов в СвС – 21,3 %, высокие остаточные напряжения, дефекты формирования швов и др. Выявлен значительный объем нарушений технологических процессов, сборки, сварки и т. д.

Для сравнения приведем структурную формулу дефектности, установленную на одном из предприятий [1] (рис. 3).

Причины разрушения сварных конструкций	Случаи разрушения, %
Нерациональность спроектированных конструкций	28,8
В том числе:	
- неправильное конструирование соединений ;	22,5
- введение сварных узлов в участки повышенных напряжений.	6,3
Наличие дефектов в сварных соединениях	21,3
В том числе:	
- дефекты в швах и высокие остаточные напряжения ;	12,5
- дефекты формирования швов .	8,8
Повышение напряжения при эксплуатации, чрезмерные нагрузки	20,0
Нарушение технологии сварки, особенно для трудносвариваемых сталей .	18,7
Влияние коррозии .	5,0

Рис. 2. Причины разрушения сварных конструкций по данным МИС

Квалификация	→ $K_v = П(1,3) + Ш(0,8) + ПШБВ(0,5) + Н(0,5) + Пд(0,1)$.
Технология	→ $T_n = П(1,4) + Ш(1,1) + ПШБВ(0,3) + Пд(0,1)$.
Электроды	→ $Эл = П(1,8) + Ш(0,6) + ПШБВ(0,4)$.
Подготовка, сборка	→ $Пс = П(0,6) + Ш(0,4) + Н(1,3) + С_m(0,2)$.
Условия	→ $Ус = П(1,0) + Ш(0,7) + Н(0,5)$

Рис. 3. Структурная формула дефектности

Как видно из формулы дефектности, обнаруживается аналогичная тенденция (см. рис. 2).

Вместе с тем отсутствуют (не контролируются) такие важные факторы качества, как проектирование конструкций, тепловложения, измерения напряжений, недостаточен важный контроль внешним осмотром и измерением, например, плавность перехода от наплавленного металла к основному свариваемому металлу, геометрия сварного шва и др.

В табл. 1 показаны выявляемые дефекты при сварке трубопроводов малых диаметров. По данным контрольных лабораторий и НП секции «Сварка и родственные технологии», при ручной дуговой сварке труб диаметром 57...159 мм на объектах сварочных работ обнаруживается повышенный уровень дефектности.

Табл. 1. Дефектность и причины ее образования при ручной дуговой сварке труб диаметром 57...159 мм (по данным анализа)

Причины дефектности брака	Контр. соединения, шт.	Процент по разным причинам	Количество недопустимых и общих дефектов на участке контроля					Сумма всех дефектов, шт.	Д _б , шт./уч.	Д _о , шт./уч.
			П, шт.	Ш, шт.	Н, шт.	Цепочки и скопления пор и шлаковых включений, шт.	Подрез, смещение, ослабление корня шва, шт.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Некачественные сварочные материалы	163	32,9	289	99	15	18	2	423	2,6	4,4
Плохая подготовка кромок	135	27,2	195	49	74	13	2	333	2,2	2,5
Некачественная сборка	96	19,4	71	25	76	6	7	185	1,9	2,2
Нарушение технологии	47	9,5	101	17	11	4	1	134	2,4	2,8
Низкая квалификация сварщика	34	6,9	75	7	7	16	0	105	1,1	3,1
Неблагоприятные условия	13	2,6	29	0	1	7	0	37	2,8	4,8
Небрежность сварщика	7	1,4	22	0	4	0	0	26	2,2	3,7
Итого	495	99,9	782	197	188	64	12	1243	2,1	3,4

В табл. 1 по вертикальным столбцам 6–8 дефекты являются протяженными, преимущественно длиной 5...20 мм, условно принятые как одиночные. Аналогично для цепочек, скоплений пор, шлаков и подрезов.

Каждый конкретный дефект сварного изделия в этой таблице появился в результате причин, которые могут быть установлены только с введением на объекте Управляющего контроля процессов сварки и соединений.

По данным анализа дефектности Базовых партий на конкурсе сварщиков, общие итоги уровня дефектности по способам сварки выглядят следующим образом (табл. 2).

Табл. 2. Анализ дефектности Базовых партий сварных соединений по отраслям и Базовым совокупностям

Способ сварки	Количество сварщиков, чел.	Выявленная дефектность		Количество дефектов на 100 мм	
		Общая дефектность Σ од	Недопустимые дефекты Σ н. д	Σ од/100 мм	Σ н. д/100 мм
1	2	3	4	5	6
Нефтехимия					
135	3	11	8	1,25	0,89
141	3	15	8	1,67	0,89
111	12	60	44	1,79	1,31
Образование					
135	13	72	60	1,38	1,15
141	4	12	8	2,27	1,51
111	13	114	93	3,14	2,56
Промышленность					
135	30	126	95	1,10	0,8
141	4	10	7	1,90	1,33
111	8	51	45	2,28	2,05
Энергетика					
135	9	54	31	1,50	0,86
141	6	18	12	2,23	1,25
111	34	228	193	2,40	2,03
Архитектура и строительство					
135	7	55и	38	1,97	1,36
141	1	–	–	–	–
111	5	38	34	2,72	2,43
Коммунальное хозяйство					
135	2	9	7	1,13	0,88
141	Не представлены				
111	Не представлены				
Транспорт и коммуникация (участие в конкурсе не принимали)					
Организация областной подчиненности					
135	18	43	34	1,20	0,94
141	8	29	18	2,65	1,71
111	8	43	35	1,92	1,57
Средний уровень дефектности по способам сварки					
135	82	327	239	1,4	0,8
141	26	55	35	2,0	1,5
111	83	491	409	2,4	2,0
Всего	188				

Примечания

135 – механизированная сварка в защитных газах плоских образцов в вертикальном и горизонтальном положениях толщиной 6 мм.

141 – аргонно-дуговая сварка труб диаметром 57 мм, толщина стенки 4 мм.

111 – ручная дуговая сварка труб диаметром 57 мм, толщина стенки 3,5 мм.

Основные недостатки схемы «ГнГ» на объектах сварочных работ приведены в табл. 3.

Табл. 3. Недостатки схемы контроля «ГнГ»

Результаты анализов и исследований
<p>1. Контроль «ГнГ» не обеспечивает качества, он только отделяет годные СвС от негодных.</p> <p>2. Контроль «ГнГ» высокзатратный, абсолютно безынформативный.</p> <p>2.1. Не выполняется учет и информация о дефектах и несоответствиях.</p> <p>2.2. Не выполняется оперативный и обобщенный анализ дефектности по БПС.</p> <p>2.3. Не выполняются расчеты уровней качества и доминирующих факторов.</p> <p>2.4. Не выполняется учет действующих факторов на объектах СвР.</p> <p>2.5. Не устанавливается исходный уровень качества по БПС.</p> <p>2.6. Из-за невыполнения пп. 2.1–2.5 невозможно устанавливать и причины брака.</p> <p>2.7. По тем же условиям пп. 2.1–2.5 неясно, как предупреждать образование дефектов.</p> <p>2.8. Не выполняется разработка мероприятий по предупреждению образования дефектов, в том числе из-за незнания основ сварочных процессов.</p> <p>2.9. Не ведется планирование качества СвС по показателям и уровню дефектности.</p> <p>2.10. Не проводится обучение исполнителей: сварщиков, слесарей, ИТР и др. применительно к условиям и требованиям конкретного объекта сварки</p>

Выводы.

1. Как видно из приведенных на рисунках и в таблицах анализов и фактов, контроль по схеме «Годен – негоден» не удовлетворяет современным требованиям по обнаружению дефектов сварных соединений в различного рода металлоконструкциях и не обеспечивает их качество.

2. Установлено: наибольший объем брака допускается при ручных способах сварки, что указывает на необходимость ее замены механизированными и автоматизированными способами. В то же время способы 135 и 141 не отлажены, а их качество не всегда удовлетворяет действующим нормам ТНПА.

3. В целом, главными причинами брака сварных соединений при сварке являются: несовершенная организация, неумелая работа и слабые, недостаточные знания (или отсутствие таковых), а также!!! нарушение технологических процессов конкретного способа сварки для конкретной БПС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Денисов, Л. С.** Основы обеспечения бездефектной сварки, система статистического регулирования и управления качеством сварочных работ / Л. С. Денисов. – Минск: Право и экономика, 2020. – 228 с.: ил.

УДК 621.791

**СИСТЕМА И МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО
НОРМАТИВНОГО КАЧЕСТВА СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ
ПРОЦЕССОВ И СОЕДИНЕНИЙ**

Л. С. ДЕНИСОВ

ОО «Белорусское инженерное общество»
Минск, Беларусь

UDC 621.791

**SYSTEM AND MECHANISMS FOR ENSURING THE REQUIRED
REGULATORY QUALITY OF ASSEMBLY AND WELDING PROCESSES
AND JOINTS**

L. S. DENISOV

Аннотация. Предложена система управляющего контроля технологических процессов и сварных соединений, позволяющая обеспечивать требуемое качество согласно нормативным требованиям.

Ключевые слова: контроль, дефекты, анализ дефектности, уровень качества, факторы качества, базовые совокупности стыков (БСС).

Abstract. A system of control monitoring of technological processes and welded joints is proposed, which allows to ensure the required quality according to regulatory requirements.

Keywords: control, defects, defect analysis, quality level, quality factors, basic sets of joints (BSJ).

*«... Качество вряд ли имеет
достижимые пределы, тогда
как количество природных
богатств и производственных
ресурсов, несомненно, ограничено...»*

Сегодня и в обозримом будущем сварка остается основным и незаменимым методом соединения материалов во всем мире.

В острой рыночной конкуренции выдвигается один главный приоритет – качество изделий и сооружений, обеспечивающее лучший уровень жизни человека (комфорт, удобство и безопасность).

На промышленных предприятиях, заводах, стройках, в процессе реконструкции выполняют десятки и сотни миллионов сварных соединений. Это обстоятельство требует постоянного внимания к качеству сварочных работ и сварных соединений, однозначно влияющих на надежность конструкции, изделий и сооружений в процессе эксплуатации.

В настоящее время разработана Научно-производственной секцией «Сварка и родственные технологии» Концепция обеспечения качества

сварочных работ включает пять-семь значимых доминирующих производственных и технологических факторов, участвующих в формировании соединений и требуемого качества, а также, что весьма важно, в совершенствовании сварочного производства. К этим факторам относятся:

- квалификация и мотивация исполнителей;
- наличие и состояние нормативной базы, ее исполнение;
- сварочные и свариваемые материалы, сварные конструкции и изделия;
- сварочное оборудование и техоснастка;
- подготовка и сборка под сварку;
- способы сварки, алгоритмы процессов сварки и регламенты;
- послесварочные операции.

Указанными факторами на объектах сварочных работ генерируется до 70 %...90 % всей дефектности, и поэтому основное и первоочередное внимание производств должно быть сосредоточено на проблемных факторах. *Это, по сути, и есть сегодня первоочередная задача восстановления, развития и совершенствования сварочного производства на каждом предприятии, заводе, стройке, сварочной и ремонтной базе, фирме.*

Очень важно и срочно необходимо решение задач по главным первоочередным доминирующим факторам сварочного производства. В том числе:

- повышение профессионального мастерства рабочих и специалистов (ИТР);
- установление эффективной структуры способов сварки – переход от ручной к механизированным и автоматизированным;
- применение эффективного сварочного оборудования и оснастки;
- использование качественных сварочных материалов;
- снижение металлоемкости сварочных конструкций и массы наплавленного металла;
- применение актуализированной и прогрессивной нормативной базы;
- применение обязательных правил подготовки к производству сварочных работ;
- обеспечение мер требуемого уровня качества сварных конструкций и дефектности соединений;
- планирование качества сварных соединений в промышленности и строительстве на 2020 г. и 2025 г.;
- внедрение новой высокоэффективной и низкочатратной системы Управляющего контроля процессов и качества соединений, рассмотренного далее.

Трудности управления качеством определяются сложностью объекта сварочных работ. Это, в первую очередь, отсутствие математического описания объекта, стохастичность поведения процессов на объектах, определенное несоответствие – «нетерпимость» к управлению объектом (можно сказать, несоответствие цели управления с целью объекта), нестандартность объекта (дрейф его параметров и характеристик во времени), невозпроизводимость экспериментов и др.

Для установления исходного уровня качества по всем доминирующим факторам (в данном случае принято пять факторов) разработаны параметрические и многофакторные модели формирования качества.

Математическая модель можно записать в следующем виде:

$$\Sigma(D'L')_{\text{ВЫХ}} = F[\Sigma(DL)_{\text{ВХ}}, P_C, Y_B],$$

где $\Sigma(DL)_{\text{ВХ}}$ – планируемое качество процесса X; P_C – систематически случайные помехи; Y_B – регулируемое или управляемое воздействие; $\Sigma(D'L')_{\text{ВЫХ}}$ – получаемое выходное качество.

*«...Чтобы создать в себе знание,
следует проникнуться к вещи
и постигнуть ее закон...»
Чжу Си «Великое учение»*

Впервые теория статистического управляющего контроля сварных соединений начала разрабатываться в МВТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва) проф. В. Н. Волченко с участием канд. техн. наук, ныне академика РАН, проф. Н. П. Алешина, канд. техн. наук, доц. Б. Г. Маслова. В дальнейшем развитие теории и практики управляющего контроля применительно к производственным условиям сварочных работ выполнялось в Минском институте «Сварка и защитные покрытия» д-ром техн. наук, проф. Л. С. Денисовым, д-ром техн. наук, проф. В. П. Куликовым, канд. техн. наук, доц. П. В. Занковцом. Научно-производственная секция «Сварка и родственные технологии» Белорусского инженерного общества (далее – «Секция сварки») с начала создания института проводит систематические исследования по обеспечению качества сварочных работ и сварных соединений на строительных объектах в промышленности, энергетике, нефтехимии и др.

Секцией «Сварка» разработана четырехуровневая функциональная система управления качеством сварочных работ для целой отрасли, отдельного объекта, машины и т. д. (рис. 1).

Установлены и изучены условия и факторы, воздействующие на процессы сварки при формировании сварных соединений и их качества.

Установлена *абсолютная необходимость* внедрения статистических методов в системе Управляющего контроля качества как для отдельных способов сварки, так и всего комплекса процедур, от подготовки до сдачи продукции.

В настоящее время разработаны «Методические руководства по управлению качеством сварочных работ»; механизмы регулирования первого уровня системы, механизмы управления второго, третьего и четвертого уровней; алгоритмы проведения комплексного анализа производства, регулирования и корректировки процессов сварки.

На фоне формирования качества сварных соединений показана возможность контролировать уровень качества и при условии изменений объекта и доминирующих факторов. Впервые проведены исследования и обширные

анализы доминирующих факторов сварочного производства (факторы качества); установлены действия доминирующих факторов на сварочных объектах на период конца XX и начала XXI ст., разработаны модели управления и механизмы управляющего качества (табл. 1).



Рис. 1. Четырехуровневая система управления качеством сварочных работ

Табл. 1. Доминирующие факторы качества

Доминирующий фактор качества	Степень влияния фактора		Требование
	Высокая степень влияния	Значимость	
Квалификация и мотивация исполнителей	+++++	+++++	Высокие знания, умение и практика
Наличие прогрессивной нормативной базы (НБ)	+++	+++	Знание и реализация на практике НБ
Свариваемые и сварочные материалы	++	++	Знание свариваемости материалов
Сварочное оборудование и тех. оснастка	++	++	Знание и умение работать на современном оборудовании
Подготовка и сборка под сварку	+++++	+++++	Обеспечение точности и качества сборки
Процессы сварки и регламенты	+++++	+++++	Отработка и точность исполнения режимов
Послесварочные операции и контроль	+++	+++	Достоверность контроля и анализа качества, установление причин брака
<i>Примечание</i> – Следует учитывать и другие возможно появляющиеся факторы			

Рассмотрим Управляющий контроль процессов сварки и сварных соединений на первом уровне.

Управляющий контроль на первом уровне. Первый уровень Управляющего контроля является базовым для всей четырехуровневой системы. Чтобы определить состояние качества выполняемых технологических операций, процессы должны исследоваться по законам статистической механики. Необходимо их достоверно контролировать, анализировать и при отклонениях от стандартных (расчетных) уровней выполнять подналадку, т. е. осуществлять регулирование.

При Управляющем контроле регулирование каждой операции производится по цепочке «Дефект – Причина – Фактор» (Д – П – Ф). В ходе исполнения операции или после ее окончания профессиональный оператор, исследуя этот процесс по обратной связи, указывает исполнителю, где нарушен технологический ход сварки и как исправить нарушения.

Для этого, используя также и историю качества, выполняют расчеты границ регулирования, разрабатывают методики и процедуры статистического регулирования (рис. 2).



Рис. 2. Механизм Управляющего контроля качеством процессов и сварных соединений на первом уровне (объекта сварочных работ)

Основой Управляющего контроля на первом уровне служат предупредительные статистические карты контроля, в которых границы регулирования выражены через показатели качества Д и L, а причины брака определяются по факторам качества – через структуру дефектности и их количество (или протяженность). Такие карты составляют ежегодно на основе накопленной информации. Границы регулирования (доверительные интервалы), так же как и показатели качества, должны утверждаться на текущий год техническим отделом вышестоящей организации. Регулирование осуществляется подготовленными квалифицированными операторами лаборатории совместно с

технологами по сварке на основании текущих значений D или L , которые определяют выборочным неразрушающим контролем стыков базовой совокупности или иными методами контроля.

Рассмотрим краткий алгоритм действий профессионального оператора на объекте сварочных работ при Управляющем контроле (первый уровень четырехуровневой системы).

1. Внешний контроль: осмотр и измерение сварных соединений. По окончании контроля составляют акт по качеству внешнего контроля сварного шва.

2. Проведение радиографического или ультразвукового контроля сварных соединений (или других методов контроля). Делают заключение о качестве СвС.

3. При контроле устанавливают значение параметров (D или L) и наносят его на контрольную карту. Если параметр находится в пределах границ регулирования, очередная выборка берется в зависимости от объемов и ответственности сварочных работ на объекте. Обычно шаг выборки контроля на объектах во времени составляет одну-две выборки из общего количества сваренных стыков у каждого сварщика за неделю.

При больших объемах сварочных работ и высокой ответственности изделия, сооружения шаг выборки может быть сокращен вплоть до одной-трех выборок за смену. В случае наличия разлаженности сварочного процесса принимаются меры по его стабилизации. Для налаживания стабильности процесса в течение смены берется не менее трех выборок: начало работ, середина и в конце смены.

4. При разлаженности процесса, т. е. при выходе значений показателя за верхнюю (ВГР) или предупредительную (ПГР) границу контрольной карты, проводят повторную выборку из той же совокупности стыков. Определяют значение параметра D (или L). При подтверждении неудовлетворительного результата расщепляют параметр на типы дефектов: П – поры, Ш – шлаковые включения, Н – непровары и т. д. Устанавливают структурную формулу дефектности по данным выборочного контроля.

5. Определяют причины брака при разлаженности процесса. Для этого структурную формулу текущей выборки сравнивают со структурной формулой статистической дефектности доминирующих причин за прошедший год. Путем сравнения структур и на основании действующих в период контроля факторов устанавливают достоверные причины брака, возникающие в данное время на данном объекте. О действующих причинах информируют непосредственных исполнителей и руководителей цеха завода и монтажного объекта.

6. Совместно с организацией, выполняющей сварочные работы (начальник участка, ответственный за сварочные работы, главный сварщик), анализируют и принимают меры по устранению причин дефектности и брака.

Результаты эффективности действия установленных мер по устранению причин определяют по данным параметров D (или L) внеочередных выборок, взятых после корректирующего воздействия действующих причин.

7. При регулировании технологических процессов особое значение имеет оперативность действия обратных связей. Как показала практика, максимальный эффект получают, если регулирование вводят в начале сварочных работ на объекте, а в дальнейшем – по установленной периодичности взятия выборок. Необходимо,

чтобы все процедуры по времени поступления корректировочных воздействий укладывались в одну-две рабочие смены.

Примечание – При стабильном процессе (параметр в пределах границ регулирования) время от контроля выборки до передачи информации исполнителю должно составлять не более 2 ч. В случае разлаженного процесса – 3...3,5 ч (рис. 3).

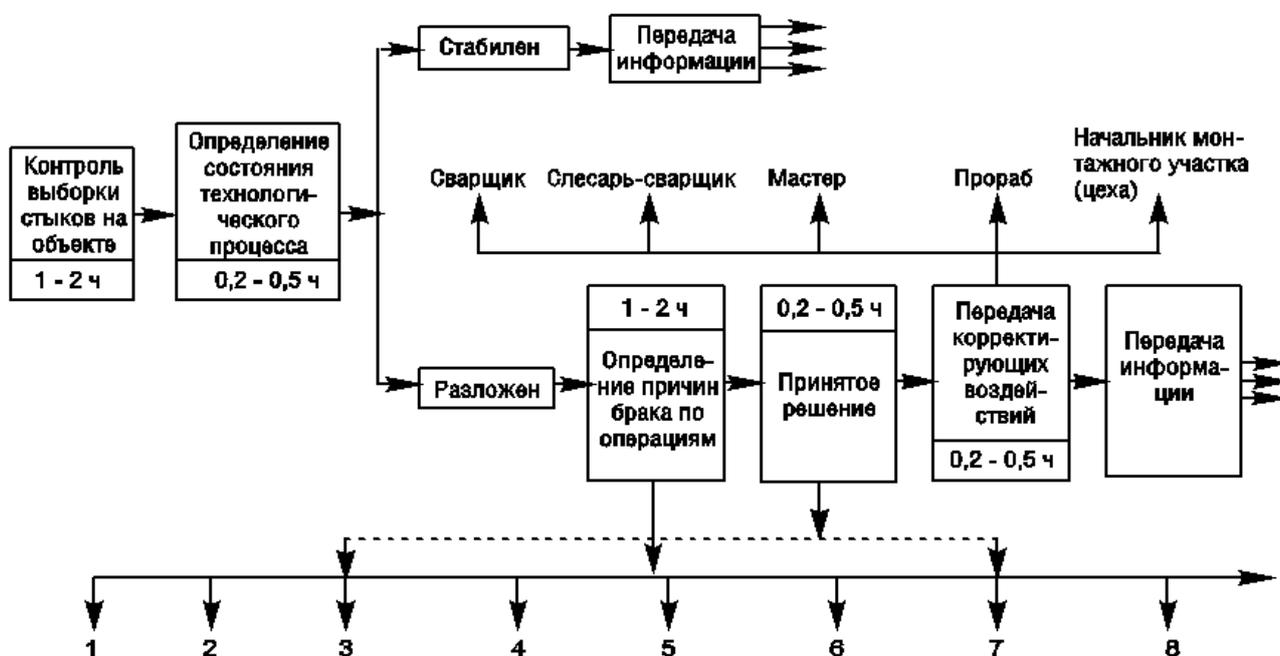


Рис. 3. Процедуры статистического регулирования на объекте сварки: 1 – подготовка; 2 – сборка; 3 – сварка; 4 – контроль; 5 – качество материалов, складирование; 6 – прокатка, наличие пеналов для хранения электродов у сварщика на объекте; 7 – состояние оборудования, приспособлений, инструмента; 8 – условия работ, защита от атмосферных помех; 9 – наличие технической документации и действующих удостоверений у исполнителей и др.

8. При выполнении Управляющего контроля каждый оператор должен знать:

- когда, при каких значениях D или L технологический процесс считается налаженным, а когда наступает разладка;
- каков период отбора выборок, т. е. время между очередными выборками контролируемых соединений;
- способ отбора соединений в выборку;
- объем выборки.

9. Меры, принимаемые при сигнале контрольной карты о разладке процесса или предупреждающем сигнале, отмечаются в протоколе или отчетах.

Пример выполнения статистического Управляющего контроля.

Исходные данные: сварочные работы ведет передвижная механизированная колонна монтажного треста. Объект – лакокрасочный завод (ЛКЗ). Стыки трубопровода диаметром $57...108 \cdot 4$ мм. На этом объекте требуется провести Управляющий контроль качества процессов сварки и соединений.

История качества. Историей качества зарегистрирован наибольший уровень брака по доле забракованных стыков – $B = 18,7\%$. По контролируемой базовой совокупности стыков Р.1 уровень брака B за этот же период составил $13,7\%$ по сравнению с прошлым годом.

Вводные данные. Управляющий контроль качества технологических процессов и соединений на данном объекте проводим по показателю дефектности D_0 с использованием рассчитанной по истории качества предупредительной контрольной карты. Значения $D_0 = 1,5$; ПГР = 1,6; ВГР = 1,75 (рис. 5). В дальнейшем все процедуры регулирования проводятся по этой карте. При анализе дефектности, допускаемой сварщиками при сварке, установлены доминирующие причины дефектности, характерные для этой организации: низкая квалификация сварщиков, нарушение технологии сварки, неудовлетворительные условия сварки, низкое качество электродов и сборки под сварку.

Установленная структурная формула дефектности.

Квалификация	→	$Kв = П(1,3) + Ш(0,8) + ПШБВ(0,5) + Н(0,5) + Пд(0,1)$.
Технология	→	$Тн = П(1,4) + Ш(1,1) + ПШБВ(0,3) + Пд(0,1)$.
Электроды	→	$Эл = П(1,8) + Ш(0,6) + ПШБВ(0,4)$.
Подготовка, сборка	→	$Пс = П(0,6) + Ш(0,4) + Н(1,3) + См(0,2)$.
Условия	→	$Ус = П(1,0) + Ш(0,7) + Н(0,5)$.

На рис. 4 и 5 показаны время разладки процесса сварки, величина дефектов и причины.

Дата	D_0	П	Ш	ПШБВ	Н	См	Пд	Причины
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	4,2	1,4	0,9	0,4	0,2	—	0,2	Квалификация
4	3,9	1,1	0,8	0,3	0,4	—	0,1	Технология
6	2,7	0,5	0,4	0,1	0,5	0,1	—	Подготовка, сборка
7	1,6	0,5	0,3	—	0,1	0,1	0,1	
9–16	Процесс стабилизирован							

Рис. 4. Установление причин брака по выявленной дефектности (Р.1)

Первая, а затем и вторая выборки показали значения D_0 выше ВГР (см. рис. 5). Сварочный процесс оказался разлаженным: $D_0 = 4,2$; $D_6 = 3,1$. Определение структурной формулы дефектности по первым двум выборкам указывало на причину – низкая квалификация сварщика. Проверка этой причины подтвердилась. Сварщики вплоть до начала работ на объекте ЛКЗ не были заняты на сварке ответственных конструкций, а выполняли различные вспомогательные работы. Это привело к потере ими навыков, растренировке, различным нарушениям технологии сварки. После установления причины брака со сварщиками проведена приобъектная тренировка с показом и разъяснением ошибок. По внеочередным контрольным выборкам выявлено некоторое

улучшение качества. Однако процесс оставался разлаженным, т. к. значения \bar{D}_o двух выборок лежали выше ВГР и ПГР, поэтому 4, 6, 7 февраля (см. рис. 4 и 5) продолжалась наладка сборочно-сварочных процессов: приобъектная тренировка, обучение сварщиков и слесарей-сборщиков, оснащение объекта шлифовальными машинками и другими инструментами для качественной подготовки и сборки под сварку, жесткий контроль за качеством материалов.

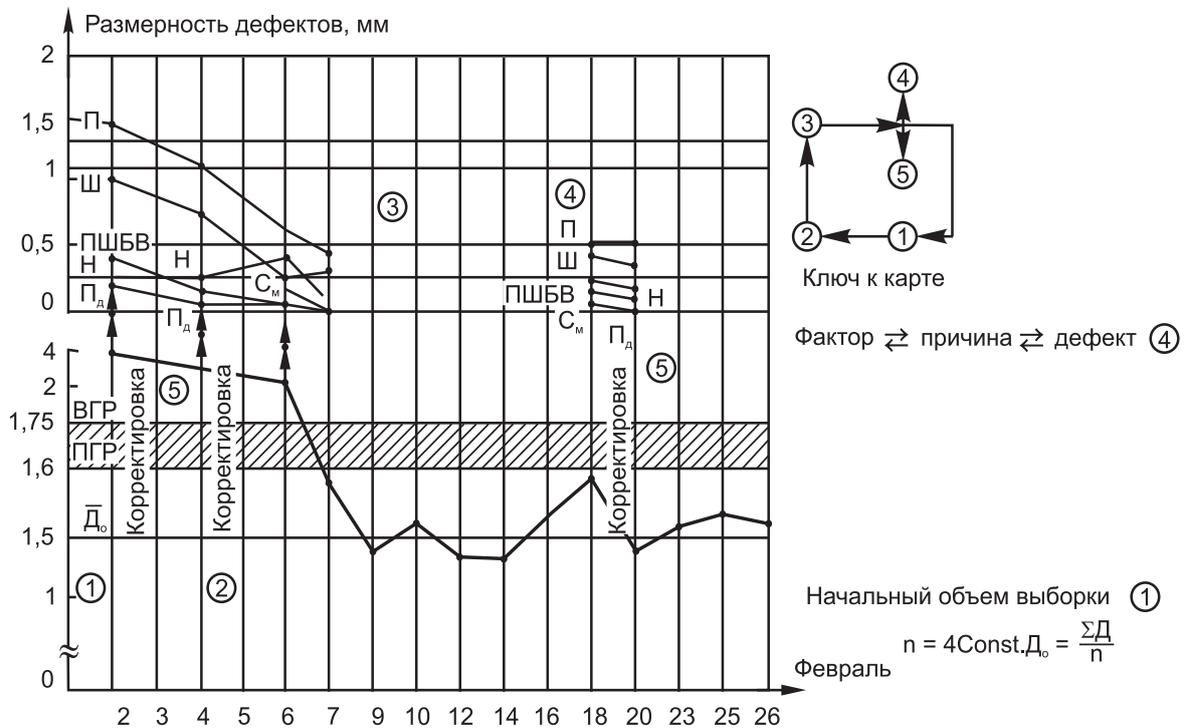


Рис. 5. Карта статистического регулирования процессов сварочных работ на объекте по показателю \bar{D} , БПС-Р.1

Контрольные выборки, взятые после проведения, обучения и наладочных работ (см. рис. 4), показали снижение дефектов – пор, шлаковых включений и скоплений при незначительном росте числа непроваров и смещения. Анализ внешнего осмотра и рентгенограмм подтвердил натренированность сварщиков, освоение ими технологических режимов, а также указывал на необходимость дальнейшего улучшения качества сборки. Принятые меры – разъяснение ошибок при подготовке кромок стыков и сборке под сварку – позволили уменьшить действия этой причины.

В дальнейшем качество сварки на данном объекте оставалось стабильным, и поэтому оператор сократил частоту выборок в два раза. Если значения \bar{D}_o , близкие к ПГР, фиксируются два раза и более, проводится анализ структурной формулы дефектности очередной выборки для определения систематических причин и принятия мер по их устранению.

Далее Управляющий контроль начинают с контроля выборки стыков сварщика на объекте объемом два участка длиной 300 мм. Для этого могут быть пригодны результаты действующих объемов контроля и т. д.

Рассмотрим основное Управляющее ядро контроля [2].

На всех объектах управление осуществляют по цепочке статистической зависимости, описывающей количественную связь.

Фактор \Leftrightarrow Причина \Leftrightarrow Дефект.

Установлена управляющая количественная связь между фактором, причиной и дефектностью.

Выполнение Управляющего контроля качества на объектах сварочных работ проводится по нижним стрелкам связей ($\Phi \leftarrow \Pi \leftarrow \Delta$).

При проектировании технологических процессов или при совершенствовании условий сварки и действующих факторов Управляющий контроль проводится по верхним связям стрелок ($\Phi \rightarrow \Pi \rightarrow \Delta$).

Конечным итогом управления являются количественные результаты причинно-следственных связей факторов, причин и дефектности (рис. 6).

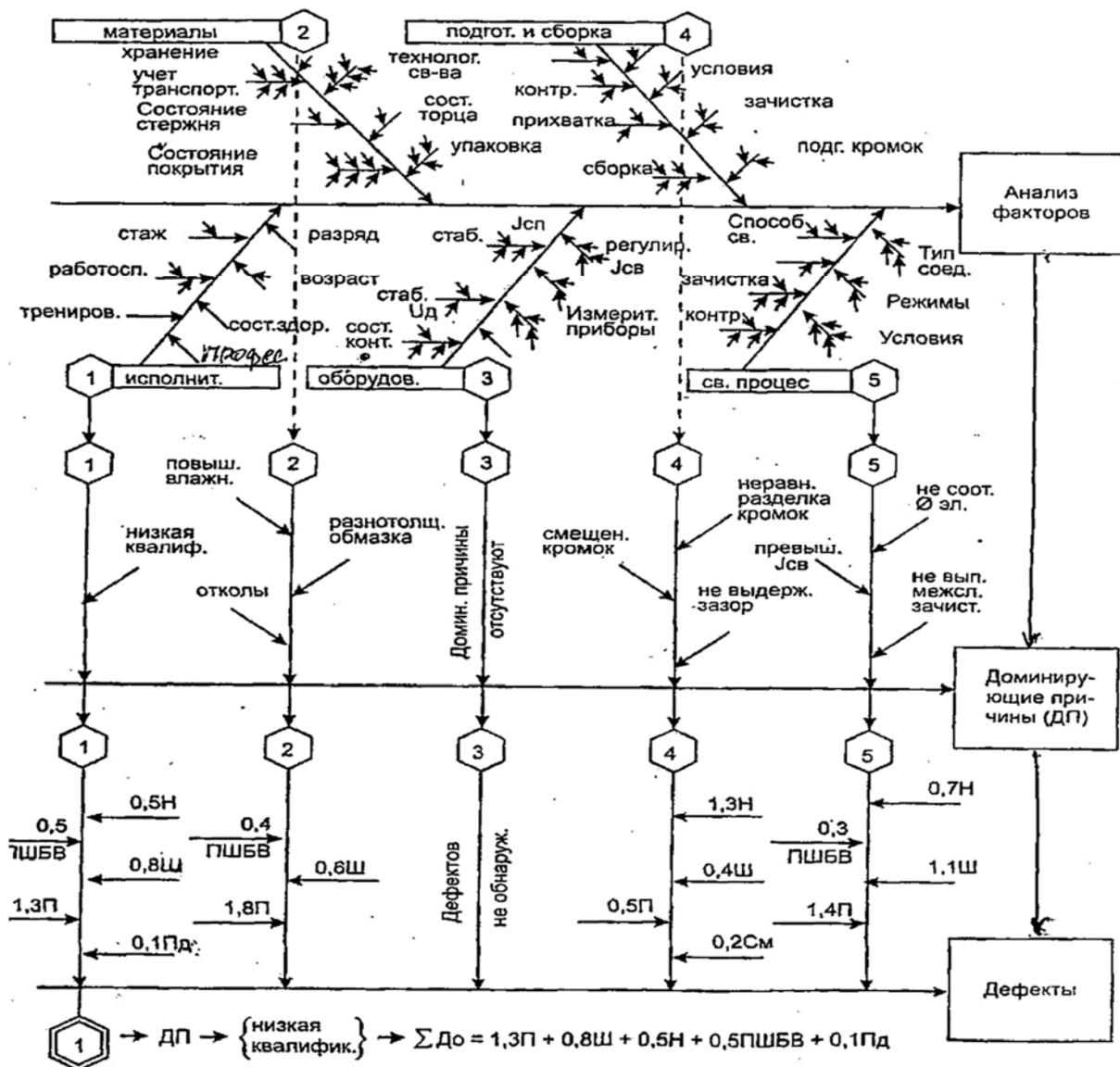


Рис. 6. Причинно-следственные связи факторов с дефектностью

Важным процессом Управляющего контроля является анализ факторов производства по всем присущим ему особенностям и определение причин брака. Для достоверного анализа действующих факторов необходимо проводить их учет и анализ влияния на качество [1]. Эту работу должен выполнять квалифицированный оператор не ниже третьего уровня квалификации.

Для анализа действующих факторов производства и установления отрицательных факторов параметров (ОФП) оператор должен знать регламент технологических процессов, профессионализм исполнителей сварочных работ и особенности работы для контроля и состояния каждого фактора, например: прокалка электродов, контроль качества сварочной проволоки и т. д. Как показывает практика, факторы качества действуют на процессы сварки в разное время по-разному – например, для текущего времени, период 2020–2022 гг., действуют доминирующие факторы сварочного производства.

Состояние производственных факторов должно непрерывно проследиваться и анализироваться с определением степени их воздействия на качество соединений и производительность с последующей разработкой мероприятий по их совершенствованию.

Приведенный кратко алгоритм Управляющего контроля по показателям Д, L свидетельствует о возможности стабилизации процессов на объекте сварки и обеспечения требуемого уровня качества сварных соединений на заводах и объектах сварочных работ.

Заключение. Механизмы Управляющего контроля – регулирования технологических процессов сварки непосредственно на объектах и в цехах заводов позволяют резко сокращать в три и более раза дефектность и брак сварных соединений. Особенно эффект повышения качества проявляется на объектах с небольшими объемами сварки, при выполнении разовых заказов на заводах, объектах и ремонтных работ, при частых отрывах сварщиков на работы, не связанные со сваркой.

Если сборочно-сварочные процессы не поддаются стабилизации или какие-то причины разладки не поддаются корректировке, *то решение задачи следует искать в комплексе мер, затрагивающих уже верхние производственные уровни иерархии: цех, монтажное управление, завод – трест – министерство.*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Денисов, Л. С.** Основы обеспечения бездефектной сварки, система статистического регулирования и управления качеством сварочных работ / Л. С. Денисов. – Минск: Право и экономика, 2020. – 228 с.: ил.
2. **Денисов, Л. С.** Основы концепции развития сварочного производства Республики Беларусь до 2025 г. / Л. С. Денисов. – Минск : Право и экономика, 2016. – 64 с.

УДК 621.791.927.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСЩЕПЛЕННОГО ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

С. К. ЕЛСУКОВ, И. В. ЗОРИН, Д. С. НЕСИН

Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Россия

UDC 621.791.927.5

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF A TWIN ELECTRODE FOR ELECTRIC ARC SURFACING OF CORROSION-RESISTANT STEELS

S. K. ELSUKOV, I. V. ZORIN, D. S. NESIN

Аннотация. Экспериментально установлено влияние величины напряжения дуги на ее пространственную форму и характер переноса электродного металла при двухэлектродной наплавке в среде защитных газов с общим источником питания. Дуга V-образной формы существует на общей для двух плавящихся проволок капле расплава при использовании напряжения 24...27 В. Установлено, что формирование стабильной общей для двух электродных проволок сварочной дуги обуславливает снижение проплавления основного металла на 65 % и улучшает качество формирования наплавленного металла.

Ключевые слова: двухэлектродная наплавка, аустенитные сплавы, расщепленный электрод, каплеперенос, взаимодействие дуг.

Abstract. The effect of the arc voltage on its spatial shape and the nature of the electrode metal transfer during two-electrode surfacing in a shielding gas with a common power source has been experimentally established. The V-shaped arc exists on a melt drop common for two consumable wires when using a voltage of 24...27 V. It has been established that the formation of a stable common for two electrode wires of the welding arc causes a decrease in the penetration of the base metal by 65 % and improves the quality of the deposited metal formation.

Keywords: twin electrode surfacing, austenitic alloys, split electrode, droplet transfer, interaction of arcs.

Введение. Процесс автоматизированной электродуговой наплавки двумя электродными проволоками широко используется в практике для повышения производительности операций сварки и наплавки [1]. В наиболее производительном технологическом варианте каждая из электродных проволок подключена к собственному источнику сварочного тока. Близкое расположение проволочных электродов и однонаправленность протекающего по ним сварочного тока является причиной интенсивного электромагнитного взаимодействия между дугами, что нарушает стабильность положения их в пространстве. Поэтому сварку и наплавку ведут с использованием специальных приемов, способствующих отдельному существованию во времени каждой из дуг, питаемых импульсным током [2–4].

Другой технологический вариант реализуется с разделением электрода на две проволоки, на каждой из которых сварочная дуга, питаемая общим

источником тока, существует поочередно [5]. Исследования, проводимые в этом направлении, показали, что увеличение длины дуги приводит к изменению способа переноса электродного металла в дуге от ее замыканий крупной каплей до формирования в ней струи из капель малого размера [6]. Вместе с тем переход к струйному переносу металла в «длинной» дуге способствует увеличению массопереноса в дуге за единицу времени и, соответственно, ее тепловой эффективности и является, в отличие от наплавки под флюсом [7], одной из причин увеличения проплавления основного металла, что нежелательно для технологий наплавки.

Более предпочтительно создание условий существования стабильной сварочной дуги на общей для двух проволок капле. Реализация и стабильное поддержание такого режима существования сварочной дуги связано с выявлением совокупного влияния значений межосевого расстояния, тока и напряжения на дуге на формирование капли расплава.

Поскольку такая технологическая зависимость для рассматриваемого процесса наплавки изучена недостаточно, то цель работы состоит в ее установлении.

Методы исследования. Электродуговую наплавку способом расщепленного электрода (рис. 1) производили на сварочном автомате А6 MasterTrack (ESAB) с использованием двух проволок $\varnothing 2$ мм марки Св-12Х18Н10Т в смеси аргона и двуокиси углерода (в соотношении 82 % + 18 %). Наплавку на пластины из стали марки Ст3сп размером $180 \times 100 \times 12$ вели на постоянном токе (+) на электроде. Расстояние между осями электродных проволок b выбирали из ряда 8, 10, 12 мм. Величина вылета проволок относительно торца наконечника – 15 мм, расход газовой смеси – 15 л/мин.

Изменение сварочного тока и напряжения на дуге в процессе наплавки регистрировали с частотой дискретизации 5 кГц с использованием многоканального аналого-цифрового преобразователя LA-20USB, подключенного к компьютеру. Обработку полученных осциллограмм производили с применением специализированного программного обеспечения PowerGraph 3.3. Поведение дуги на электроде и каплеперенос фиксировали с помощью скоростной видеосъемки камерой Canon J1 3 с частотой 1/400 кадров в секунду с использованием системы светофильтров (фильтра ультрафиолетового излучения, узкополосного светофильтра (длина волны 660 нм) и поляризационного фильтра (CPL)). Исследование полученных в эксперименте образцов металла производили известными методами металлографии с применением оптического метода (цифровой микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT).

Основные результаты и их обсуждение. Поскольку наиболее чувствительным параметром, влияющим на характер существования дуг, оказалось напряжение на дуге, то экспериментальные исследования проводили при фиксированной величине сварочного тока. Величину тока (330 ± 15) А выбирали исходя из обеспечения достаточно широкого и хорошо сформированного валика наплавленного металла при скорости наплавки 13 м/ч.

Экспериментально выявлены два типа существования дуги. Дуга первого типа существует при значениях напряжения 26...27 В (рис. 2, а). Крупные капли

электродного металла формируются одновременно на расположенных под углом внутренних боковых поверхностях обеих плавящихся сварочных проволок. При совокупном действии анодного и катодного плазменных потоков дуга приобретает характерную V-образную форму. Процесс перехода крупных капель в сварочную ванну стабильно повторяется с временным периодом 0,3 с и сопровождается коротким замыканием дуги.

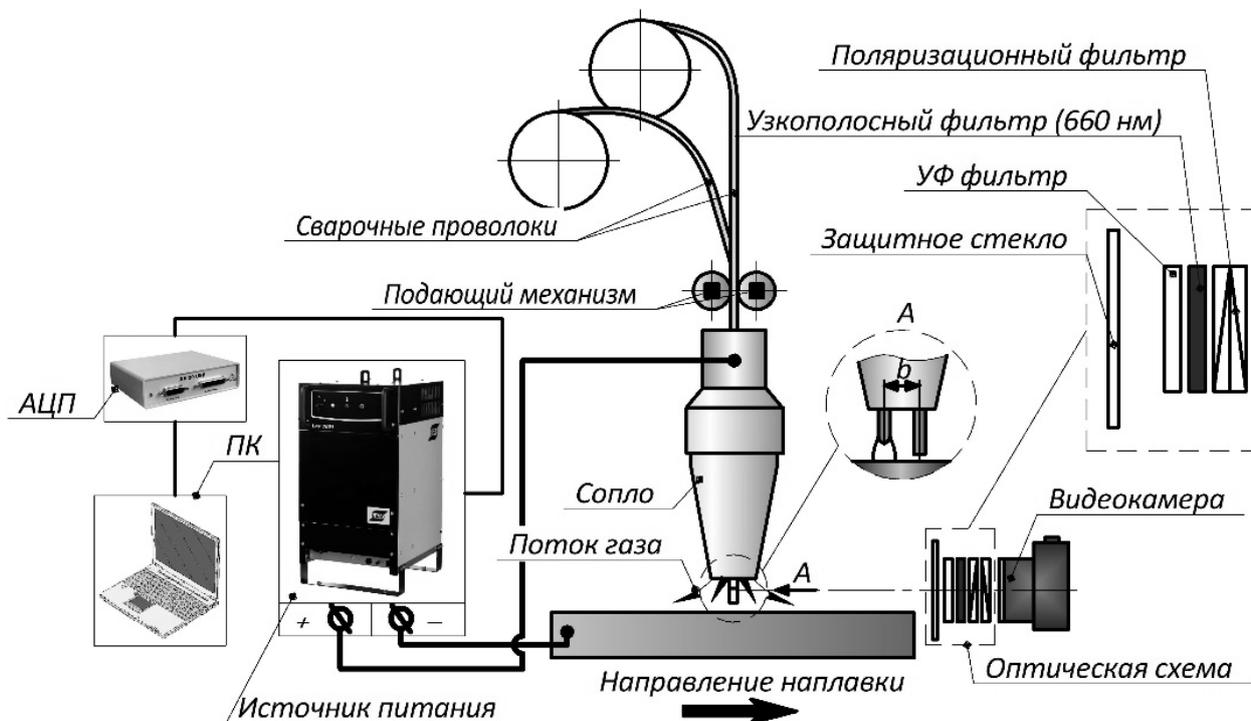


Рис. 1. Схема исследования дугового промежутка и переноса электродного металла при наплавке с регистрацией сварочного тока и напряжения

В диапазоне напряжений на дуге 27...33 В существование дуги характеризуется нерегулярным ее перемещением между торцами проволок с переменной частотой и хаотичным возникновением дуги V-образной формы, о чем свидетельствуют большие колебания значения сварочного тока во времени. Также нестабильно и каплеобразование, которое характеризуется повышенным разбрызгиванием и неудовлетворительным формированием поверхности валика.

Формирование дуги второго типа связано с увеличением напряжения на ней с 34 до 36 В. При этом длина дуги увеличивается, приобретает столбчатую форму и существует поочередно на каждой проволоке (рис. 2, б), что связано с возрастанием подвижности катодного пятна на поверхности сварочной ванны. После того, как расстояние между торцом второй проволоки и поверхностью сварочной ванны становится меньше длины дуги на первой плавящейся проволоке, анодное пятно на ее торце исчезает и вновь формируется уже на торце второй проволоки. Временной период таких повторных возбуждений дуги составляет 0,1 с. Для этого режима существования дуги характерен мелкокапельный перенос электродного металла без коротких замыканий.

Было установлено, что образование общей дуги первого типа наиболее стабильно происходит при межосевом расстоянии 10 мм. Уменьшение расстояния

до 8 мм хотя и повышает интенсивность образования общих капель в единицу времени, однако вызывает проплавление основного металла до значений (0,43 %), не рациональных для наплавки (табл. 1). С увеличением значения b до 12 мм процесс формирования общей капли периодически нестабилен, расплавы капель на торцах обеих проволок не успевают объединяться и переходят в сварочную ванну через короткое замыкание.

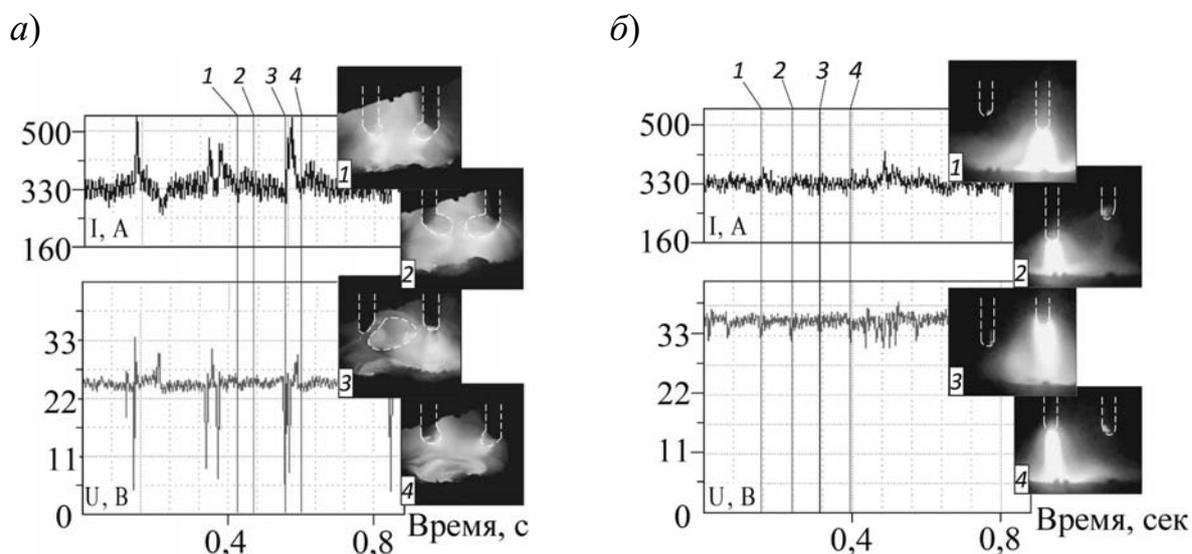


Рис. 2. Осциллограммы тока, напряжения и видеокadres основных типов дуг, существующих на двух электродных проволоках при напряжении 26 В (а) и 36 В (б)

Табл. 1. Влияние расстояния между электродными проволоками на размеры наплавленных валиков в поперечном сечении ($I = 330$ А; $U = 27$ В)

Расстояние между осями проволок b , мм	Ширина наплавленного металла, мм	Высота наплавленного металла, мм	Глубина проплавления, мм	Доля участия основного металла	Частота переноса общих капель в секунду
8	19,2	3,26	3,02	0,43	6,6
10	20,3	3,44	1,18	0,26	3,5
12	21,44	2,9	2,64	0,47	2

Анализ полученных осциллограмм и кадров видеофиксации реакционной зоны дуги позволяет рассматривать процесс ее формирования и кинетику образования капель во взаимосвязи. Формирующееся магнитное поле вокруг электрода проходящим однонаправленным током и возникающая результирующая электродинамическая сила заставляют притягиваться дуги и капли электродного металла, существующие на торцах проволок. В результате слияния двух дуг формируется общая дуга, имеющая V-образную форму (рис. 3). После соприкосновения капель и образования общей капли ее отделение от торцев обеих проволок происходит под действием пинч-эффекта. Так как сила тяжести, действующая на сформированную общую каплю, превышает силу реактивного

давления струи пара с поверхности сварочной ванны, то ее перенос через дугу происходит без разбрызгивания.

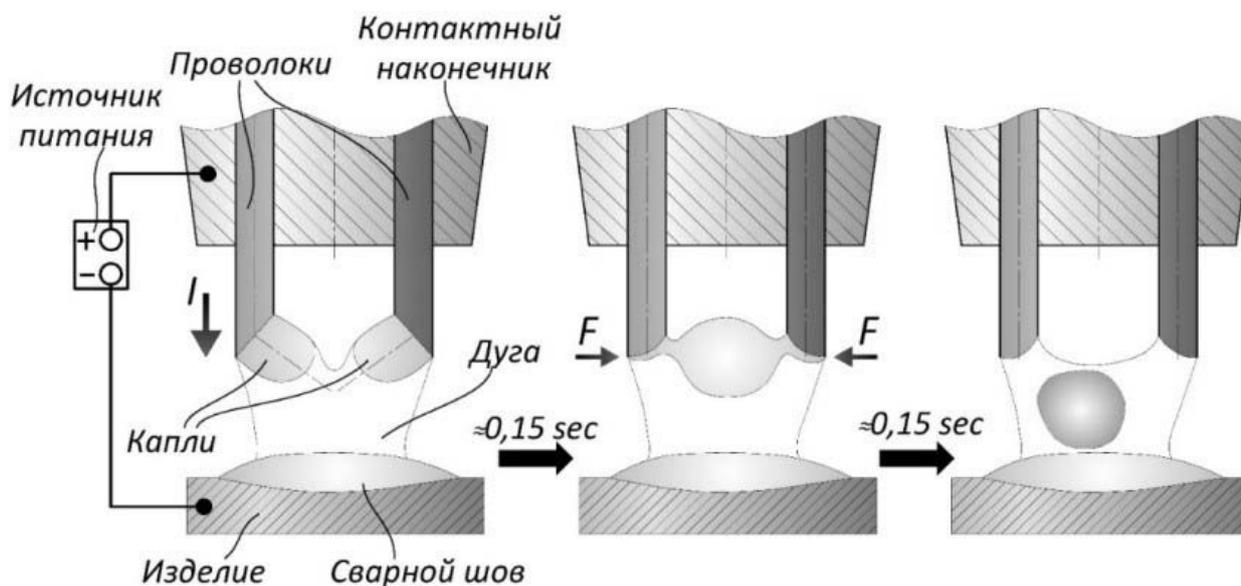


Рис. 3. Кинетика процесса образования общей капли и сварочной дуги первого типа ($I = 330 \text{ A}$; $U = 26 \text{ В}$)

При изучении сечений наплавленного металла было выявлено, что доля участия основного в наплавленном металле при напряжении 27 В составляет 0,26 (рис. 4, а). Поскольку рост объема расплавленного металла приводит к образованию общей капли, то занимаемая на ее поверхности анодным пятном дуги площадь будет увеличиваться пропорционально размеру капли. Это обстоятельство обуславливает уменьшение давления дуги на поверхность ванны. Режим поочередного существования дуги на каждой проволоке приводит к уменьшению прослойки жидкого металла под дугой и увеличению плотности теплового потока в основной металл на участках, расположенных соосно проволокам. Форма проплавления приобретает седловидную форму, а ее глубина увеличивается (рис. 4, в).

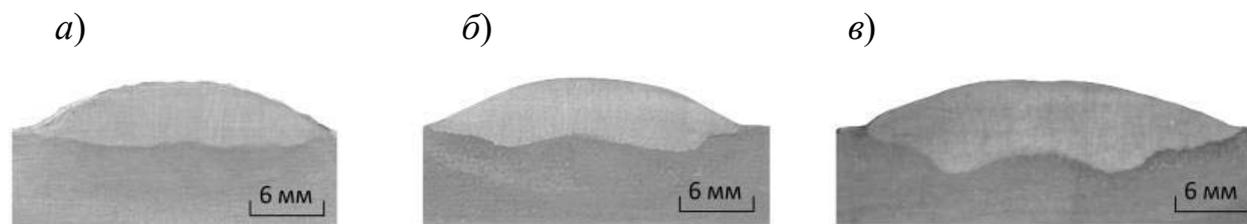


Рис. 4. Поперечное сечение валиков при напряжении на дуге 27 В (а), 32 В (б) и 36 В (в) ($I = (330 \pm 15) \text{ A}$)

Доля участия основного металла в наплавленном металле при напряжении 36 В составляет 0,43, что на 65 % больше по сравнению с дугой первого типа.

Металлургические и технологические дефекты при металлографическом исследовании сечения валика не обнаружены.

Выводы. Установлено, что при постоянном значении сварочного тока 330 А и расстоянии между двумя электродными проволоками при наплавке в смеси аргона и двуокиси углерода возможно формирование двух типов дуг, одна из которых стабильно существует в диапазоне напряжений 24...26 В и характеризуется образованием анодного пятна на общей капле, а вторая – существует попеременно на торцах сварочных проволок в диапазоне 34...36 В.

Показано, что за счет разделения величины тока между двумя сварочными проволоками и использованием межосевого расстояния 10 мм взаимное притяжение сварочных дуг и капель происходит одновременно с образованием общей капли. В результате достигается уменьшение проплавления основного металла на 65 % и улучшение качества формирования наплавленного.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 15/465-22.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. High-speed welding of steel sheets by the tandem pulsed gas metal arc welding system / T. Ueyama [et al.] // Transactions of JWRI. – 2005. – Vol. 34, № 1.
2. On process-structure-property interconnection in anti-phase synchronized twin-wire GMAW of low carbon steel / S. Q. Moinuddin [et al.] // Science and Technology of Welding & Joining. Is. 6. – 2016. – P. 452–459.
3. Analysis of current phase influence on weld seam formation in double-wire DP-GMAW / W. Kaiyuan [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 103. – P. 4825–4835.
4. **Scotti, C. O.** The effect of out-of-phase pulsing on metal transfer in twin-wire GMA welding at high current level / C. O. Scotti, L. O. Morais, Vilarinho // Welding Journal. – 2006. – Vol. 85. – P. 225–230.
5. **Спицын, В. В.** Перенос металла и горение дуги при сварке расщепленным электродом в CO₂ / В. В. Спицын // Сварочное производство. – 1969. – № 4. – С. 5–7.
6. **Groetelaars, P. J.** Influence of the arc length on metal transfer in the single potential double-wire MIG/MAG process / P. J. Groetelaars, C. Orivam de Morais, A. Scotti // Welding International. – 2009. – Vol. 23, № 2. – P. 112–119.
7. Исследование процесса наплавки расщепленным электродом сплава Inconel 625 / И. В. Зорин [и др.] // Сварочное производство. – 2018. – № 11 (1008). – С. 9–15.

E-mail: serzh.elsukov@yandex.ru; zorin.iv@vstu.ru.

УДК 539.4.016.3:669-1; УДК 621.791

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИКОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕД ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКОЙ

*В. Ю. ЖЕЛЕЗНОВ*¹, *В. Е. РОГАЛИН*¹, *Т. В. МАЛИНСКИЙ*¹,
*С. И. МИКОЛУЦКИЙ*¹, *Ю. В. ХОМИЧ*¹, *А. В. ЛЮШИНСКИЙ*²,
*Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО*³

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики
Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Авиационно-космические технологии»
Москва, Россия

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 539.4.016.3:669-1; UDC 621.791

THE USE OF THE OPTOPLASTIC EFFECT FOR THE PRELIMINARY PREPARATION OF SURFACES BEFORE DIFFUSION WELDING

*V. YU. ZHELEZNOV, V. E. ROGALIN, T. V. MALINSKIY, S. I. MIKOLUTSKIY,
YU. V. KHOMICH, A. V. LIUSHINSKII, F. I. PANTELEYENKO*

Аннотация. Показано, что при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера с плотностью энергии 0,1...1,0 Дж/см² на поверхности металлов выявлены следы проскальзывания и растрескивания по границам зерен. Внутри зерен происходило кристаллографическое скольжение. На поверхности металла возникал микровыступ высотой до 1 мкм и даже более. Полученный результат, названный оптикопластическим эффектом, рассматривается как удобный способ формирования субмикронных структур на поверхностях, подлежащих диффузионной сварке (ДС). Высказано предположение, что этот метод модификации поверхности должен эффективно стимулировать процесс ДС.

Ключевые слова: оптикопластический эффект, ультрафиолетовый (УФ) лазер, модификации поверхности, лазерная обработка, диффузионная сварка.

Abstract. It is shown that, under the impact of radiation from a nanosecond ultraviolet laser with an energy density of 0,1...1,0 J/cm², traces of sliding and cracking along grain boundaries are revealed on the surface of metals. Crystallographic slipping occurred inside the grains. A microprotrusion with a height of up to 1 μm, and even more, appeared on the metal surface. The result obtained, called the optoplastic effect, is considered as a convenient method for the formation of submicron structures on surfaces subject to diffusion welding (DW). It has been suggested that this method of surface modification should effectively stimulate the DW process.

Keywords: optoplastic effect, ultraviolet (UV) laser, surface modifications, laser processing, diffusion welding.

Диффузионная сварка в настоящее время активно применяется в высокотехнологичных областях промышленности, прежде всего таких, как атомная и авиакосмическая. Там требуется использование конструктивных элементов на пределе их технических возможностей. Нередко для этого требуется прочное и точное соединение в одной детали разнородных материалов, и часто данный процесс возможен исключительно с использованием ДС [1, 2], т. к. далеко не все материалы поддаются традиционным методам сварки.

Для увеличения предела прочности сварного шва при ДС, а также для снижения оптимальной температуры процесса, что, зачастую, бывает принципиально важно, вследствие нежелательности превышения температуры фазового перехода материала в процессе сварки применяют различные методы интенсификации процесса.

В последнее время для этого начинают применять предварительное микро- и наноструктурирование поверхностей свариваемых деталей при воздействии лазерными импульсами наносекундной длительности [3–5] с целью улучшения адгезионных свойств. Адгезия, как известно [6], определяется, прежде всего, диффузионными явлениями, а импульсное лазерное воздействие способствует резкому изменению параметров диффузии, вплоть до увеличения коэффициента диффузии на величину до 6–10 порядков [7, 8]. Эти процессы происходят в поверхностном слое, поэтому его модификация может оказать значительное влияние на ДС.

До сегодняшнего дня считалось, что процесс микро- и наноструктурирования поверхности при лазерном воздействии происходит при превышении порога оптического пробоя, сопровождаемого интенсивным плазмообразованием, плавлением и испарением металла с образованием кратера [3]. Однако недавно был обнаружен оптикопластический эффект [9, 10]. При воздействии излучения наносекундного УФ-лазера на поверхности меди и ее сплавов при предпороговых значениях плотности энергии были выявлены заметные изменения структуры металла без изменения фазового состояния. В настоящее время исследования этого нового явления продолжаются.

Сообщается о продолжении этих исследований в части углубленного анализа результатов измерений профилограмм поверхности металла в зоне воздействия лазерного излучения.

Исследовали образцы из бескислородной меди, полированные по стандартной оптической технологии [11]. Как и в [9, 10], где подробно изложена методика эксперимента, использовался импульсно-периодический Nd:YAG-лазер (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм, энергия в импульсе $E = 8$ мДж при длительности $\tau = 10$ нс, частота повторения $f = 10$ Гц). Воздействие производили при комнатной температуре ~ 20 °С.

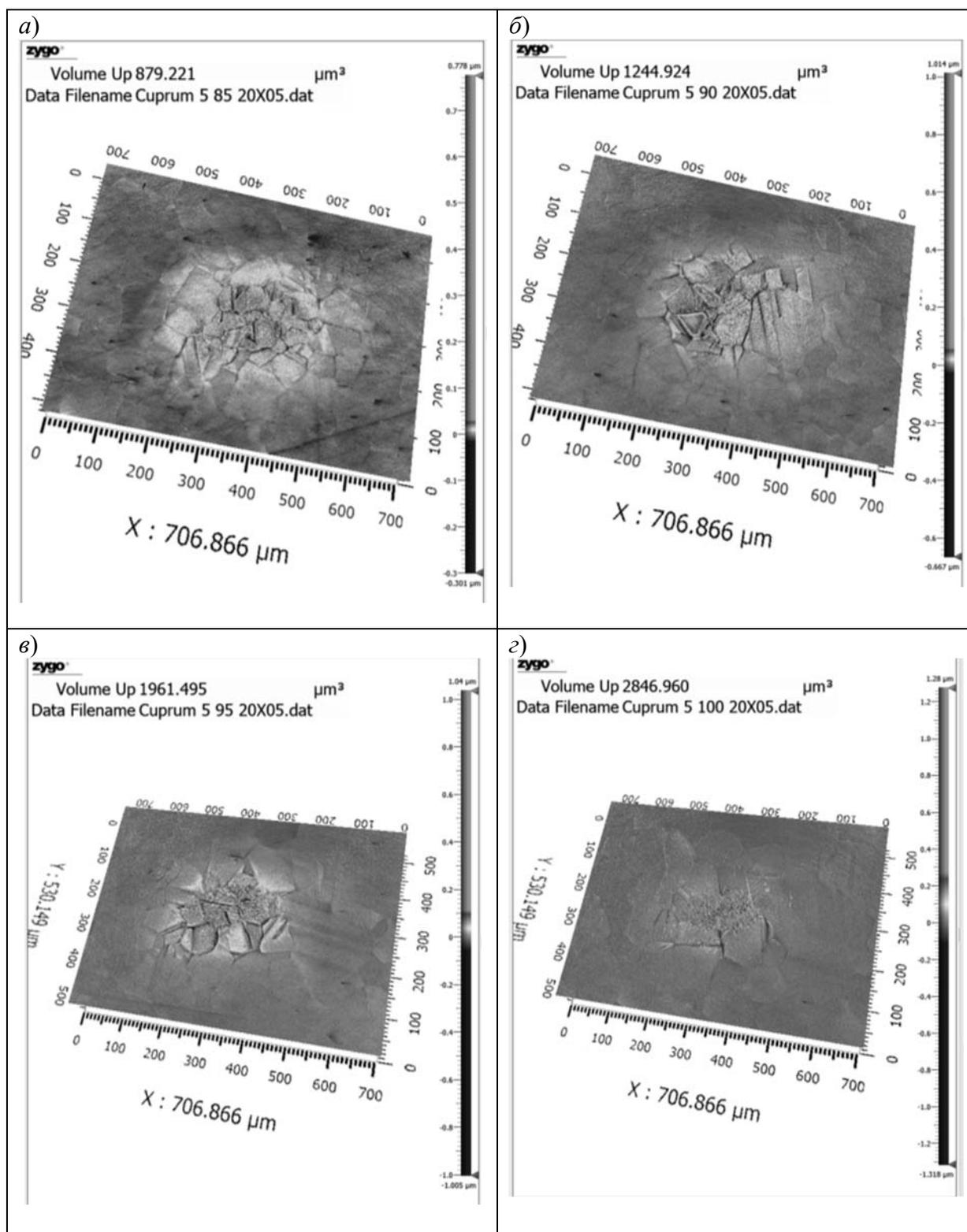


Рис. 1. Профилограммы поднятий на поверхности зеркал из бескислородной меди после воздействия пятью импульсами УФ-лазера при плотности энергии: *a* – $0,61 \text{ Дж/см}^2$ – $V = 880 \text{ мкм}^3$, $PV = 1,08 \text{ мкм}$; *б* – $0,82 \text{ Дж/см}^2$ – $V = 1245 \text{ мкм}^3$, $PV = 1,682 \text{ мкм}$; *в* – $1,02 \text{ Дж/см}^2$ – $V = 1960 \text{ мкм}^3$, $PV = 2,45 \text{ мкм}$; *г* – $1,07 \text{ Дж/см}^2$ – $V = 2850 \text{ мкм}^3$, $PV = 2,6 \text{ мкм}$

Ранее в [9, 10] сообщалось, что при таком режиме поверхность образца успевает, в течение импульса 10 нс, полностью нагреться до предплавильной температуры и полностью остыть за время ~ 20 нс. Таким образом, следующий импульс воздействует на полностью остывшую поверхность. Облученные образцы исследовались на профилометре Zygo New View 7300 и анализировались с использованием программ MetroPro 8.3.5 и Mx.

Состояние поверхности контролировалось и на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6610LV.

На каждом образце измерялись объем образовавшегося поднятия на поверхности и величина PV – перепада высот на поверхности в измеряемом кадре размером $0,71 \times 0,53$ мкм².

Обнаружена явная тенденция роста объема поднятий и значения PV как от количества воздействующих импульсов, так и от средней плотности энергии импульсов. Данные получены при изменении средней плотности энергии импульсов в диапазоне $0,2 \dots 1,07$ Дж/см². При $E \sim 1,0$ Дж/см² начинается плавление поверхностного слоя.

Диапазон плотностей энергии, при которых удалось наблюдать реально измеряемые объемы возникающих поднятий, довольно узкий – $E = 0,1 \dots 1,0$ Дж/см². При меньших значениях E на наноуровне также возникают аналогичные повреждения, но они не обнаруживаются на фоне реальной шероховатости поверхности образца. Возможно, что при существенно меньшей шероховатости их удастся обнаружить.

Верхняя граница наблюдаемого оптикопластического эффекта – $1,0$ Дж/см². Это величина порога оптического пробоя меди при использованных параметрах излучения. При превышении данного значения в приповерхностном слое металла в зоне воздействия происходит фазовый переход из конденсированного состояния, плавление и испарение металла. Это явление изучено в [12]. Образовавшийся кратер и бруствер вокруг него из выброшенного расплавленного металла значительно превышают размеры поднятия и полностью перекрывают оптикопластический эффект, хотя процессы в приповерхностном слое, приводящие к этому эффекту, видимо, продолжаются.

Поглощение света металлами изучено в [13]. Электронная подсистема перегревается при передаче энергии фотонов электронам скин-слоя ~ 15 нм. За время электрон-ионной релаксации ($2 \dots 3$ пс) происходит поглощение энергии фононами и резкий нагрев приповерхностного слоя. Процесс сопровождается резким ростом концентрации неравновесных точечных дефектов.

Известно радиационное распухание [14] – процесс, происходящий при непрерывном режиме воздействия ионизирующего излучения. Но при воздействии разнообразных импульсных полей наблюдается аномальный

массоперенос [7, 8]. Основную ответственность за такую аномалию несет перемещение межузельных атомов по механизму Шоттки. Предполагается [15], что плавление кристаллических металлов происходит в результате лавинообразной генерации межузельных дефектов.

Количество избыточных атомов на поверхности, появившихся в результате воздействия (объем поднятия), соответствует, по порядку величины, концентрации межузельных атомов в меди при предплавильных температурах [16, 17] $\sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$.

В данном случае для образования поднятия в приповерхностном слое меди оказалось достаточно этого количества межузельных атомов, возникших при высокотемпературных процессах.

При оптикопластическом эффекте поднятие на оптической поверхности при воздействии импульсов наносекундного УФ-лазера при плотности энергии $0,1 \dots 1,0 \text{ Дж/см}^2$ формируется при сохранении конденсированного состояния металла, за счет пластической деформации нагретого приповерхностного слоя. При быстром нагреве и охлаждении этого слоя наблюдалось движение структурных дефектов – межузельных атомов, дислокаций и границ зерен. Заметный вклад в массоперенос внесен благодаря генерации избыточного количества точечных дефектов при предплавильных температурах. Межузельные атомы диффундируют на поверхность по механизму Шоттки. В то же время менее подвижные вакансии, видимо, остаются преимущественно в узлах решетки и не успевают коагулировать за время процесса ($\sim 30 \text{ нс}$). Объем поднятия пропорционален вложенной энергии в поверхностный слой как за счет роста плотности энергии импульсов, так и за счет их количества. Это подтверждает тепловой механизм оптикопластического эффекта при наносекундном воздействии ультрафиолетовых лазерных импульсов.

Таким образом, созданный при оптикопластическом эффекте слой на поверхностях свариваемых материалов должен эффективно содействовать процессу ДС. Сохранение металла в конденсированном состоянии позволяет рассчитывать на уменьшение массы оксидов на поверхности, охрупчивающих зону сварки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красулин, Ю. Л.** О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 1. – С. 89–97.
2. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – Москва: Академия, 2006. – 208 с.

3. **Хомич, В. Ю.** Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов / В. Ю. Хомич, В. А. Шмаков // *Успехи физических наук.* – 2015. – Т. 185, № 5. – С. 489–499.
4. Способ сварки деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе с использованием лазерного излучения: пат. 2752822 С1 / Т. В. Малинский, С. И. Миколуцкий, В. Е. Рогалин, С. А. Филин, Ю. В. Хомич, В. А. Ямщиков. – Опубл. 06.08.2021.
5. **Хомич, В. Ю.** Исследование термической обработки поверхностей металлов и керамик наносекундными импульсами лазерного ультрафиолетового излучения для диффузионной сварки: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.1 (05.16.01) / В. Ю. Хомич. – Санкт-Петербург, 2021. – 139 л.
6. **Voyutskii, S. S.** The Diffusion Theory of Adhesion / S. S. Voyutskii // *Rubber Chemistry and Technology.* – 1960. – Vol. 33, № 3. – P. 748–756.
7. Влияние многократного лазерного воздействия на массоперенос в железе / М. Е. Гуревич [и др.] // *Металлофизика.* – 1978. – Т. 73. – С. 80–83.
8. Изменение структуры сплава медь–хром, облученного импульсом CO₂-лазера / Р. Е. Ровинский [и др.] // *Физ. и хим. обраб. матер.* – 1980. – № 3. – С. 7–11.
9. Пластическая деформация меди в результате воздействия мощного ультрафиолетового наносекундного лазерного импульса / Т. В. Малинский [и др.] // *Письма в ЖТФ.* – 2020. – Т. 46, вып. 16. – С. 51–54.
10. **Малинский, Т. В.** Пластическая деформация меди и ее сплавов при воздействии наносекундным ультрафиолетовым лазерным импульсом / Т. В. Малинский, В. Е. Рогалин, В. А. Ямщиков // *Физика металлов и металловедение.* – 2022. – Т. 123, № 2. – С. 192–199.
11. **Окатов, М. А.** Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов. – Санкт-Петербург: Политехника, 2004. – 679 с.
12. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – Москва: Наука, 1970. – 272 с.
13. **Соколов, А. В.** Оптические свойства металлов / А. В. Соколов. – Москва: Физматлит, 1961. – 464 с.
14. **Зеленский, В. Ф.** Радиационные дефекты и набухание металлов / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, Т. П. Черняева. – Киев: Наукова думка, 1988. – 296 с.
15. String-like cooperative motion in homogeneous melting / H. Zhang [et al.] // *Journal of Chemical Physics.* – 2013. – Vol. 138. – P. 125–538.
16. **Simmons, R. O.** Measurement of equilibrium concentrations of vacancies in copper / R. O. Simmons, R. W. Balluffi // *Physical Review.* – 1963. – Vol. 129. – P. 1533–15445.
17. **Mei, Q. S.** Melting and superheating of crystalline solids: From bulk to nanocrystals / Q. S. Mei, K. Lu // *Progress in Materials Science.* – 2007. – Vol. 52. – P. 1175–1262.

УДК 621.791

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

П. В. ЗАНКОВЕЦ, П. А. ШКУРДЮК

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.791

COMPUTER SYSTEMS IN WELDING FABRICATION PROCESS DESIGN AUTOMATION AND WELDED JOINTS QUALITY ASSURANCE

P. V. ZANKOVETS, P. A. SHKOURDUKE

Аннотация. С использованием математического моделирования и исследования технологических процессов сборочно-сварочных работ разработаны и внедрены в производство ряд информационно-аналитических систем, позволяющих осуществлять учет, контроль и анализ качества сварки, устанавливать причины образования дефектности и способы их предупреждения. При этом для энергоресурсосбережения в сварке разработаны технически обоснованные системы расчета норм расхода сварочных и вспомогательных материалов, параметров режима сварки, расчет норм основного и вспомогательного времени на различные способы дуговой сварки металлоконструкций.

Ключевые слова: качество сварки, сварные соединения, дефектность, дуговая сварка, базы данных и знаний, причины брака, режимы сварки, нормы расхода сварочных материалов, нормы времени на сварку.

Abstract. A number of the information analysis systems, allowing to carry out the welding quality account, control and analysis, are developed and introduced in manufacture to establish the deficiency formation reasons and ways of its prevention with use of mathematical simulation together with assembly and welding work technological processes research. At the same time the technologically reasonable systems of calculating the material consumption rates for welding consumables and auxiliary materials, welding conditions parameters, the basic and auxiliary standard times for different manners of structural steel arc welding providing the energy and resources saving in welding are developed.

Keywords: welding quality, welded joints, deficiency, arc welding, data and knowledge bases, deficiency reasons, welding conditions, welding consumables consumption rates, standard times for welding.

Мировой опыт показывает, что применение только прогрессивных технологий не обеспечивает требуемый уровень качества сварки, т. к. сборочно-сварочное производство является, по сути, сложнейшим процессом, зависимым от множества как внутренних, так и внешних факторов. Поэтому для формирования бездефектных сварных соединений необходимо постоянно совершенствовать системы управления качеством сборочно-сварочных работ. Вместо

приемочных операций по отбраковке негодных сварных соединений должен применяться оперативный контроль по предупреждению брака на всех производственных стадиях подготовки, сборки и сварки. Однако, чтобы предупреждать брак, необходимо знать наиболее вероятные причины его появления. В системе управления качеством сварных соединений проблема определения и предупреждения причин дефектов сборочно-сварочных работ является, безусловно, одной из важнейших. Решение проблемы возможно только в комплексе единых методов и средств, обеспечивающих выполнение установленных требований, основанных на знании влияния основных производственных факторов на качество сварных соединений и позволяющих предотвращать дефекты до начала процесса производства на промежуточных этапах, а не в готовом изделии. Следовательно, необходима разработка методов и средств, основанных на концепции бездефектного изготовления сварных соединений на конкретном сборочно-сварочном производстве. Основой для решения проблемы является система учета, контроля и анализа качества сварочных работ и сварных соединений (рис. 1–3).

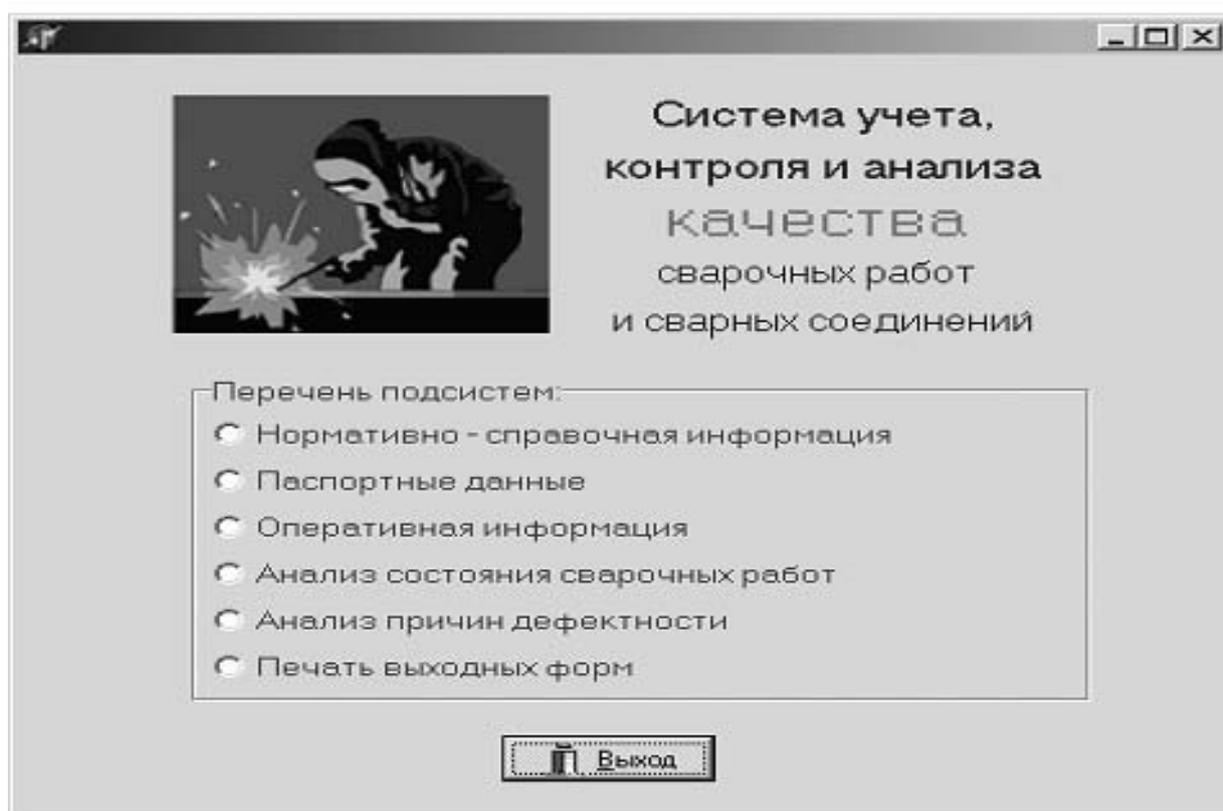


Рис. 1. Головное меню системы учета, контроля и анализа качества сварочных работ и сварных соединений

На рынке программных продуктов СНГ достаточно широко применяются и постоянно совершенствуются системы, разработанные НПП «ИНТЕРМЕХ», АО «Топ Системы», АО «АСКОН», ПО «КОМПАС» и др. Эти системы предназначены для технологической подготовки производства деталей, позволяют формировать выходную технологическую документацию, однако решение

расчетных задач при проектировании техпроцессов сварки ограничено конкретными способами сварки.

База данных контроля сварных стыков

Дата	РГГ или УЗК	Клеймо	Кл. 1	Кл. 2	Кл. 3	Пров. стык	Деф. стык	D	S	Пр. шва	Пр. деф.	Причина
01.01.2008	РГГ	И				0	0		8	600	0	
01.01.2008	РГГ	Ш				4	1	273	6	3428,9	250	Сварочное оборудование
01.01.2008	РГГ	ГГ				5	0	159	9	2496,3	0	
01.02.2008	УЗК	ЧЧЧ				13	0	159	5	6490	0	
01.02.2008	УЗК	Н				0	0		15	17550	850	Сварочные материалы
01.02.2008	УЗК	88				0	0		15	17550	850	Прочие
01.02.2008	УЗК	66				0	0		10	1500	0	
01.02.2008	УЗК	Л2				0	0		8	24000	0	
01.02.2008	УЗК	11				0	0		8	26000	2000	Технология сварки
01.02.2008	УЗК	ППП				1	0	1020	14	3203	0	
01.02.2008	УЗК	66				1	0	630	14	1978	0	Квалификация сварщика
01.02.2008	УЗК	66				4	0	630	12	7913	0	
01.02.2008	УЗК	ППП				3	2	325	10	3062	480	Квалификация сварщика
01.02.2008	УЗК	99				3	2	325	10	3062	520	Подготовка и сборка

Фильтрация: Нет Дата + РГГ Дата Дата + УЗК Клеймо Дата + Клеймо Дата + Причина

Период выборки: 01.04.2009 < 09.04.2009

Клеймо- Список (ФИО): 11

Причина дефектности: Подготовка и сборка

Обновить Запись в Excel Сводная табл. Выход

Рис. 2. Пример работы с базой данных о состоянии качества сварочных работ

Таким образом, системы, предназначенные для автоматизации технологической подготовки в сварочно-монтажном производстве, практически отсутствуют. Такие ограничения связаны с крайней неоднородностью и разнообразием способов сварки, свариваемых и сварочных материалов, оборудования, типов сварных соединений. Поэтому значительно усложняется формализация задач и создание алгоритмов, программных средств, больших по объему и сложных по структуре баз данных и знаний. Следовательно, задача разработки информационных технологий в сварке, позволяющих обеспечить требуемое качество сборочно-сварочных работ и сварных соединений, имеет очень важное значение для всей отрасли сварочного производства.

Разработанный комплекс информационно-аналитических систем (ИАС) позволяет оперативно получать информацию, необходимую для принятия проектных решений по технологическим процессам сборочно-сварочных работ, и решать расчетные задачи, связанные с профессиональной деятельностью конструкторов и технологов. Представленные расчетные задачи охватывают наиболее распространенные в машиностроении и строительстве способы дуговой сварки.

Например, в системе расчета норм расхода сварочных материалов на механизированную дуговую сварку в защитном газе (рис. 4) решаются следующие задачи:

- подготовка и накопление исходных данных для расчета;
- расчет площади поперечного сечения сварного шва;
- расчет нормы расхода сварочных материалов (электродов, проволоки, флюса, газа) на 1 м шва и расхода на выполнение сварного шва;
- формирование исходных данных и результатов расчета в формате, соответствующем правилам записи информации в технологических документах;
- формирование и сохранение файла результатов расчета на магнитных носителях.

Дата	РГГ или УЗК	Клеймо	Кл. 1	Кл. 2	Кл. 3	Пров. стык.	Деф. стык.	D	S	Пр. шва	Пр. деф.	Причина
08.03.2010	РГГ	M2				62	3	159	5	30954,1	370	Подготовка и сборка
13.03.2010	РГГ	88				5	2	219	6	3438,3	340	Подготовка и сборка
17.03.2010	РГГ	11	C2			8	1	325	6	8164	250	Подготовка и сборка
27.03.2010	УЗК	ЮЮ	22			27	2	273	36	23144,94	420	Подготовка и сборка
30.03.2010	УЗК	Э	РР			7	2	720	8	15825,6	1130	Подготовка и сборка
30.03.2010	УЗК	Э	РР			3	1	630	8	5934,6	495	Подготовка и сборка
17.05.2010	РГГ	99				27	8	720	9	61042	18086	Подготовка и сборка
22.05.2010	РГГ	С				10	2	720	9	22608	4522	Подготовка и сборка
24.05.2010	РГГ	99	C4	ППП		16	14	720	9	36173	31651	Подготовка и сборка
25.05.2010	РГГ	С				14	7	1220	11	53631	26816	Подготовка и сборка
29.05.2010	РГГ	99	ППП			11	7	1220	11	42139	10535	Подготовка и сборка
17.06.2010	РГГ	77				10	4	1220	11	69000	9600	Подготовка и сборка
22.07.2010	УЗК	T1	T	V		4	2	640	10	8038	980	Подготовка и сборка
25.07.2010	УЗК	KK	Э			4	2	2220	10	27883	3400	Подготовка и сборка
27.07.2010	УЗК	T1	T	Э		4	2	4427	10	55603	6900	Подготовка и сборка
21.08.2010	РГГ	77	ЩЩ			15	4	820	9	166200	21300	Подготовка и сборка

Рис. 3. Пример получения выходной информации по фактору «Подготовка и сборка под сварку»

Адаптация результатов расчета на условия конкретных пользователей обеспечивается поправочными коэффициентами.

Расчет параметров режима дуговой сварки выполняется для сталей (низкоуглеродистых, углеродистых, низколегированных, легированных конструкционных теплоустойчивых, высоколегированных жаропрочных, высоколегированных жаростойких, высоколегированных коррозионно-стойких), алюминия и алюминиевых сплавов, меди и медно-никелевых сплавов, титана и титановых сплавов.

В системах расчета параметров режима дуговой сварки решаются следующие задачи:

- подготовка исходных данных для расчета;

- расчет параметров режима сварки;
- расчет норм основного и вспомогательного времени на сварку;
- формирование результатов расчета в формате строки «Р» для вставки в технологический документ.

Рис. 4. Пример подготовки данных и результаты расчета норм расхода сварочных материалов на механизированную дуговую сварку в защитном газе

На рис. 5 представлены форма подготовки данных и результаты расчета параметров режима на механизированную дуговую сварку в защитном газе.

Отдельной подгруппой задач представлены системы расчета норм расхода сварочных материалов в строительстве:

- система расчета норм расхода сварочных материалов при сварке стальных трубопроводов (ручная дуговая, газовая, аргоно-дуговая и комбинированная, типы сварных соединений по ГОСТ 16037–80);
- система расчета норм расхода сварочных материалов при сварке листовых и решетчатых конструкций;
- система расчета норм расхода материалов при ручной и механизированной газовой резке;
- система расчета норм расхода материалов при газовой сварке.

Отличие этих систем от вышеприведенных заключается в использовании нормативной базы, применяемой в строительстве.

Расчет режимов дуговой сварки

Признак изменяемости исходных данных

Группы свариваемых материалов
Углеродистые стали

Режимы дуговой сварки в защитном газе:
Число слоев = 1
Расст. от торца сопла до детали, min LC1=10мм
Расст. от торца сопла до детали, max LC2=20мм
Сила тока min, I1=240 А
Сила тока max, I2=280 А
Напряжение дуги min, U1=24 В
Напряжение дуги max, U2=26 В
Скорость сварки min, VS1=24м/час

ГOST способа сварки
ГOST 14771-76

РИН
 АИН
 РИНп
 АИНп
 АИНп-3
 МИП
 АИП
 МУП
 АУП

Условное обозначение сварного соединения
C5

Конструктивные элементы
S = 0,8 - 8,0 мм

Максимальная толщина свариваемых деталей, мм
4

Положение сварки
Нижнее

Расположение шва
Наружный

Вид шва
Прямолинейный непрерывный

Тип проволоки
Проволока металлическая

Введите длину сварного шва, мм
1450

Выбор марки электрода (проволоки) Расчет расхода Запись

Сброс Расчет режимов Конец

DC=3-4мм;Lc=8-15мм;Lz=9-15мм;Пл=0;U=24-26В;I=240-280А;Vc=24-26м/ч;Vп=180-200м/ч;

Рис. 5. Пример подготовки данных и результаты расчета параметров режима на механизированную дуговую сварку в защитном газе

На рис. 6 представлены форма подготовки данных и результаты расчета норм расхода сварочных материалов на сварку трубопроводов.

Базы данных и знаний (БД и З) комплекса ИАС содержат файлы нормативно-справочной информации, представленные в виде таблиц, файл конструктивных элементов и размеров сварных соединений по способам сварки и типам сварных соединений и файлы, содержащие марки сварочных материалов (электродов, проволоки), сгруппированные по группам свариваемых материалов, защитные газы и флюсы, коэффициенты потерь (в зависимости от марки электрода) и другие сведения.

При работе с системами пользователю обеспечены:

- рационально организованный современный интерфейс, который обеспечивает удобство работы и позволяет избежать ошибок при подготовке данных;
- ввод, визуализация, контроль и возможность корректировки входной информации об элементах, узлах сварных конструкций;

- интеллектуальная поддержка в процессе подготовки данных и в процессе расчетов;
- возможность работы с несколькими системами в процессе подготовки текстовой технологической документации.

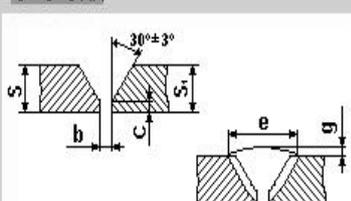
Расчет норм расхода при сварке трубопроводов

Выберите способ сварки: **Аргодуговая**

Сварка углеродистых и легированных сталей

Условное обозначение сварного соединения: **C17**

Конструктивные элементы и размеры: **S = 3 - 6 мм**



Диаметр X Толщина стенки трубы, мм: **273*6**

Длина шва, мм: **857,22**

Расход на 1 стык, кг: **Неповоротный**

Положение оси трубопровода: **Горизонтальное**

Количество одинаковых стыков, шт.: **25**

Удельный расход аргона на сварку / поддув, л/мин: **8 л/мин; 5 л/мин**

Результаты расчета

Аргодуговая сварка

Расход на 1 м: **0,314** кг сварочной проволоки, кг; **0,269** кг электродов вольфрамовых, г;

Расход на 1 стык: **4,984** л аргона на сварку, л; **529,16** л аргона на поддув, л;

Расчет расхода

Запись на диск

Запись в Excel

Сброс **Очистить файл** **Окончание работы**

Размеры сечения шва, мм

S=S _г	b		c		e		g	
	Но-мнк.	Пред. откл.						
3			0,5	+0,5	7			
4	1,0				8			
5		+0,5			9	+2		
6	1,5				11		1,5	+1,5
7					12			-1,0
8			1,0		13	+3		
10					16			
12		+1,0		±0,5	18	+4		
14	2,0				21		2,0	+2,0
16					23			-1,5
18		+1,5	1,5		26	+6		
20					28			

Аргодуговая сварка
 Тип шва = C17;
 Тип стыка = Неповоротный;
 Положение оси трубопровода=Горизонтальное;
 Толщина (катет)=6мм;
 Длина шва=857,22мм;
 Количество стыков (фланцев, патрубков)=25шт;
 Расход проволоки на 1 м шва=0,314кг;

Рис. 6. Пример подготовки данных и результаты расчета норм расхода сварочных материалов на сварку трубопроводов

Таким образом, представленные системы построены по модульному принципу и состоят из универсальных модулей, не зависящих от типа производства, и объектно-ориентированных модулей, учитывающих специфику конкретного предприятия. Каждая из систем комплекса оформлена в виде загрузочного модуля и имеет свою независимую от других базу данных и знаний. В результате такой подход позволяет адаптировать и внедрять разработанные системы на различных предприятиях, имеющих сварочное производство.

УДК 621.791.763.1

ТВЕРДОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ «АІ – СТАЛЬ», ПОЛУЧЕННЫХ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКОЙ

И. КАРАМИНАДИК, Е. Б. ДЕМЧЕНКО

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

UDC 621.791.763.1

HARDNESS OF MATERIALS WELDED JOINTS ON THE GROUND AN «AL – STEEL» GAINED BY CONTACT SPOT WELDING

I. KARAMINADIK, E. B. DEMCHENKO

Аннотация. Исследована микротвердость сварных соединений материалов на основе «АІ – сталь», полученных контактной точечной сваркой. Показано, что время протекания сварочного тока и усилие сжатия электродов практически не оказывают влияния на микротвердость сварной зоны. Распределение твердости по сечению сварной зоны в зависимости от времени сварки и величины усилия сжатия электродов неравномерно, поскольку здесь имеют место закалочные явления. Такая разница в значениях микротвердости приводит к образованию крупнозернистой структуры и ухудшению прочностных свойств свариваемых материалов.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, «АІ – сталь», биметаллические прокладки, сварная зона, зона термического влияния, микротвердость.

Abstract. The microhardness of welded joints of materials on a ground an « Al – steel» gained by contact spot welding is investigated. It is shown that the time of a leakage of a welding current and force of squeezing of electrodes practically do not render effect on a microhardness of a welded working area. Hardness allocation on cross-section of a welded working area depending on a time of welding and magnitude of force of squeezing of electrodes nonuniformly as hardening appearances here occur. Such odds in values of a microhardness lead to formation of a coarse-grain structure and a decline of a mechanical properties of welded materials.

Keywords: contact spot welding, «Al – steel», bimetal bearing disks, welded working area, heat-affected zone, microhardness.

Известно, что основным препятствием получения сварных соединений алюминия со сталью является химическая несовместимость этих материалов. В результате кристаллизации расплавленного металла соединяемых деталей в структуре сварного шва образуются хрупкие химические соединения – интерметаллиды, что сводит на нет возможность получения достаточно прочного сварного соединения.

Для контактной точечной сварки данная проблема была решена благодаря применению промежуточной биметаллической прокладки «АІ – сталь», полученной изготовленной сваркой взрывом [1–3]. В этом случае при сварке создаются два отдельных ядра на границах «алюминий – алюминий» и «сталь – сталь». Статические и динамические испытания точечных соединений показали, что по прочности они сравнимы с клепаными соединениями.

Микроструктуру и микротвердость литой зоны и зоны термического влияния по Виккерсу изучали на шлифах сварных соединений (рис. 1), полученных на разных режимах сварки.

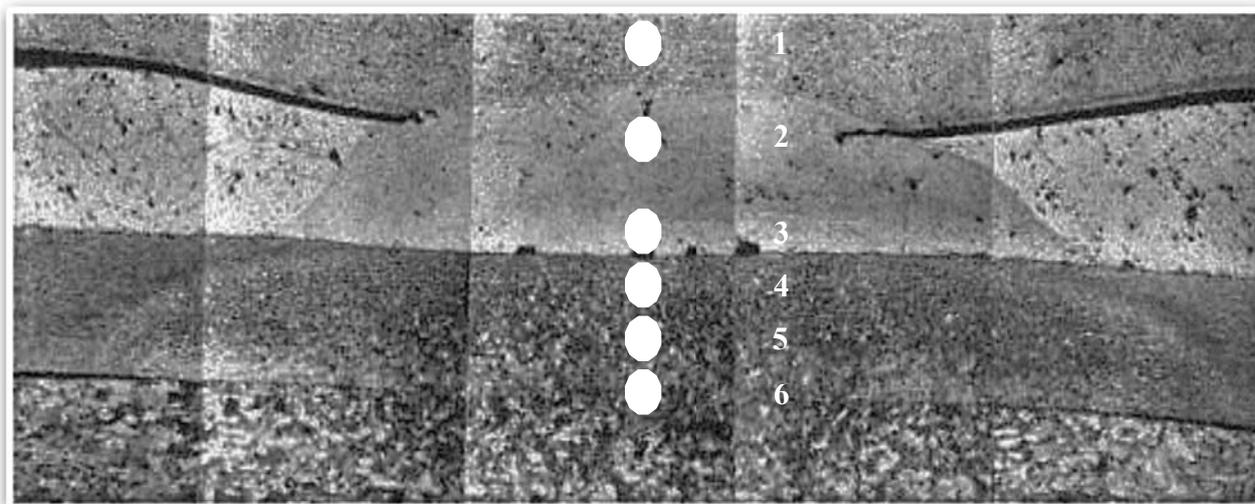


Рис. 1. Микроструктуры сварных соединений образцов и зоны измерения твердости, $\times 50$

Зависимости микротвердости от параметров режима сварки аппроксимированы по логарифмическому тренду.

В табл. 1 представлены средние значения микротвердости по Виккерсу (HV) разнородных образцов при изменении времени протекания сварочного тока $t_{cs} = 0,12 \dots 0,32$ с при $P = 2000$ Н и при изменении усилия сжатия электродов $P = 1000 \dots 3000$ Н при $t_{cs} = 0,24$ с.

Табл. 1. Средние значения микротвердости HV разнородных образцов

Параметры сварки			Твердость HV , кг/мм ²					
			Al	Al (ядро)	Сталь	Сталь (ядро)	Сталь (ядро)	Сталь
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Al (1,0 мм) + + «Al – сталь» (0,5 + 0,5) мм + + сталь «08 кп» (0,8 мм)	t_{cs} , с	0,16	51,6	54,1	366,0	366,1	265,4	169,0
		0,20	48,1	64,6	381,2	340,2	288,9	166,5
		0,24	47,5	54,1	385,9	344,7	210,2	166,6
		0,28	49,0	61,1	396,1	371,4	254,1	153,1
		0,32	47,9	59,2	403,3	309,8	251,5	188,1
		0,36	45,4	59,7	396,2	332,4	226,3	198,7
	P , Н	500	53,4	58,2	410,2	340,6	210,0	152,0
		1000	47,5	54,1	385,9	348,6	212,2	166,8
		1500	50,9	57,7	381,0	401,3	202,5	161,4
		2000	50,0	55,2	380,5	372,4	376,1	179,9

Исследование твердости проводили в наиболее характерных зонах сварного соединения (ядро, околошовная зона, основной металл), интересных с точки зрения изучения прочностных характеристик.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости средних значений микротвердости HV в различных областях образцов при изменении времени протекания сварочного тока (см. рис. 2) и усилия сжатия электродов (см. рис. 3) при постоянных параметрах времени сварки и усилия сжатия электродов.

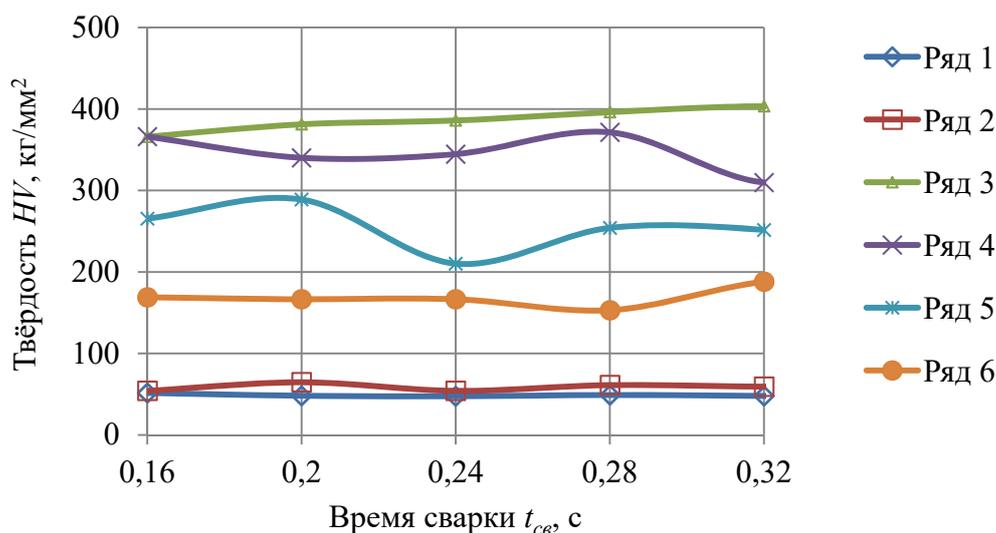


Рис. 2. Зависимость изменения микротвердости от времени сварки

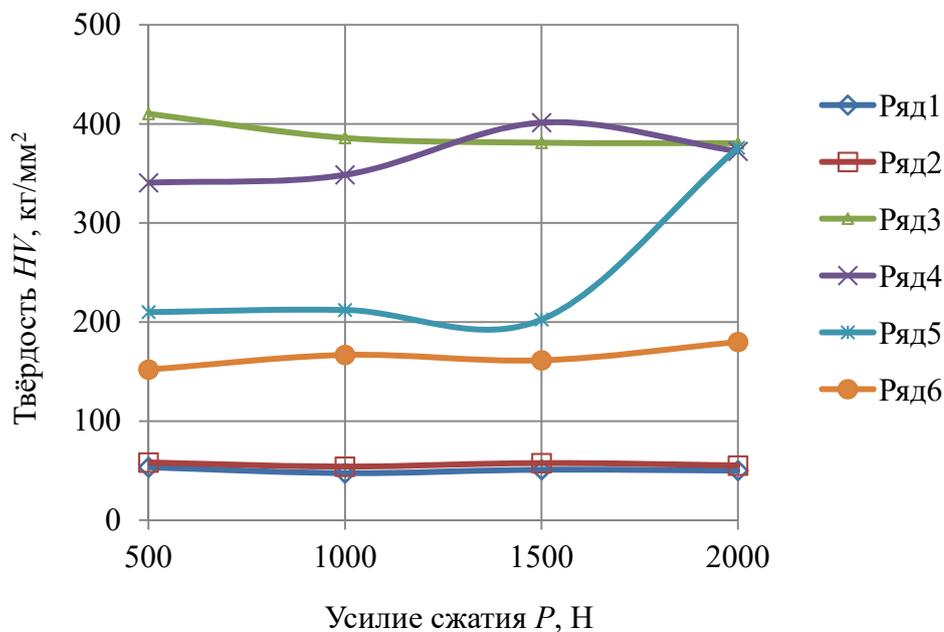


Рис. 3. Зависимость изменения микротвердости от усилия сжатия электродов

Анализ показал, что время протекания сварочного тока и усилие сжатия электродов практически не оказывают влияния на микротвердость материалов в зонах, определяющих прочностные характеристики сварного соединения.

Однако распределение твердости по сечению сварной зоны в зависимости от времени сварки (рис. 4) и величины усилия сжатия электродов (рис. 5) носит весьма сложный характер. Причинами неравномерного распределения микротвердости по сечению сварного соединения являются в основном тепловой режим сварки и различный химический состав свариваемых материалов. Наиболее вероятно то обстоятельство, что в зоне стального ядра имеют место закалочные явления.

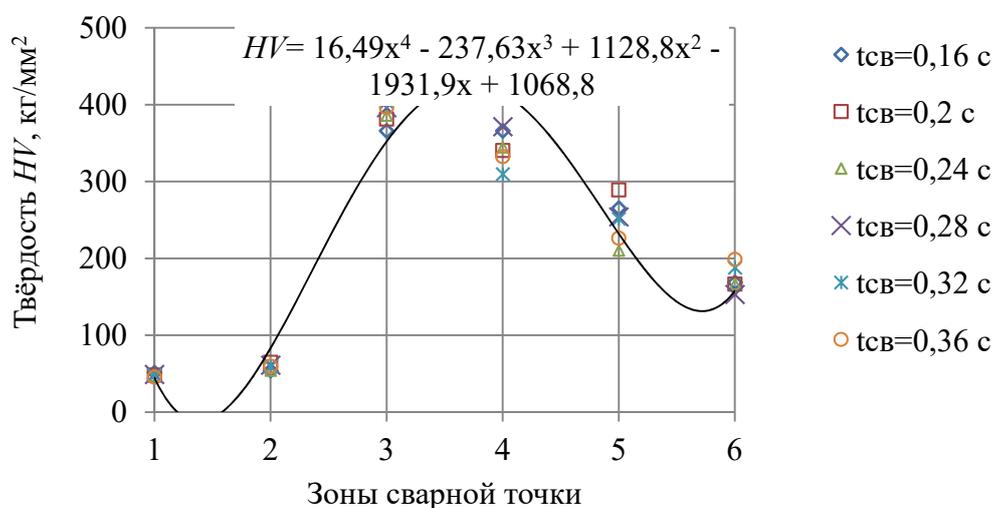


Рис. 4. Зависимость изменения микротвердости в различных зонах сварной точки во времени

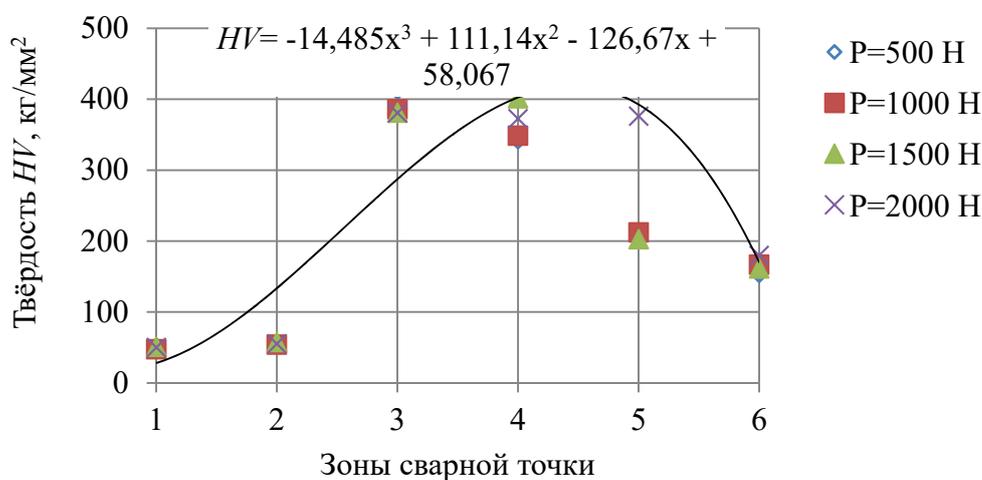


Рис. 5. Изменения микротвердости в различных зонах сварной точки

Закалка зоны сварки приводит к увеличению твердости ядра, при этом на периферии (околошовная зона, переходный слой между ОШЗ и основным металлом) твердость значительно ниже. Неравномерность химического состава и объемного распределения растворенных в расплаве при сварке металлов элементов из-за большого давления в центре сварной точки и электромагнитных сил, приводящих к быстрому перемещению микроэлементов, понижает микротвердость от центра к периферии.

Так как скорость кристаллизации металла больше скорости выравнивания концентрации элементов в ядре, сварная точка отличается неравномерным распределением элементов. Такая разница в значениях HV приводит к ухудшению прочностных свойств свариваемых материалов.

Кроме того, на периферии ядра и в ОШЗ образуется крупнозернистая металлическая структура, которая также снижает прочностные свойства. Ввиду этих причин именно здесь и происходит разрушение материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Караминадик, И.** Технология контактной точечной сварки алюминия со сталью / И. Караминадик, Е. Б. Демченко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов.* – Донецк: ДОННТУ, 2021. – С. 109–112.

2. **Караминадик, И.** Расчет и выбор режимов контактной точечной сварки соединений из разнородных материалов / И. Караминадик, Е. Б. Демченко // *Литье и металлургия – 2021: сб. науч. работ IV Междунар. науч.-практ. интернет-конф. студентов и магистрантов, Минск, 14 апр. 2021 г.* – Минск: БНТУ, 2021. – С. 49–53.

3. **Караминадик, И.** Методика исследования процесса контактной точечной сварки соединений материалов «Al – сталь» / И. Караминадик, Е. Б. Демченко // *Литье и металлургия – 2021: сб. науч. работ IV Междунар. науч.-практ. интернет-конф. студентов и магистрантов, Минск, 14 апр. 2021 г.* – Минск: БНТУ, 2019. – С. 53–56.

E-mail: edemchenko@bntu.by.

УДК 621.793

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В КАЛИЙНОЙ ОТРАСЛИ

*М. Н. КАРПЕЦ*¹, *Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО*²

¹ОАО «Беларуськалий»

Солигорск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

UDC 621.793

FEATURES OF THE APPLICATION OF PROTECTIVE THERMAL GAS COATINGS IN THE POTASSIUM INDUSTRY

M. N. KARPETS, F. I. PANTELEENKO

Аннотация. Представлены особенности применения и испытаний защитных коррозионно-стойких покрытий при производстве калийных удобрений. Определены способы увеличения прочности сцепления газотермических покрытий, применяемых в калийной отрасли. Показана эффективность использования самофлюсующихся стальных проволок для увеличения прочности сцепления, износостойкости и коррозионной стойкости покрытий.

Ключевые слова: газотермическое напыление, защитные покрытия, коррозионная стойкость, гиперзвуковая металлизация, прочность сцепления покрытий, структура покрытий.

Abstract. The features of the application and testing of protective corrosion-resistant coatings in the production of potash fertilizers are presented. Methods for increasing the adhesion strength of gas-thermal coatings used in the potash industry are determined. The effectiveness of using self-fluxing steel wires to increase the adhesion strength, wear resistance and corrosion resistance of coatings is shown.

Keywords: thermal spraying, protective coatings, corrosion resistance, hypersonic metallization, adhesion strength of coatings, coating structure.

Введение. Современные тенденции развития калийной отрасли направлены на разработку и выпуск новой продукции, наращивание объемов производства, снижение издержек, связанных с выпуском продукции, что сопровождается переходом на использование более высоких давлений, температур и агрессивных сред. Это в свою очередь приводит к повышению металлоемкости химического оборудования, увеличению затрат на его ремонт или восстановление. Как правило, значительное количество деталей машин при производстве калийных удобрений работают в условиях интенсивного изнашивания и коррозии. По условиям эксплуатации данные детали изготавливают из дорогостоящих высоколегированных хромоникелевых сталей (аустенитного и аустенитно-ферритного классов). Анализируя возможные направления сокращения издержек при эксплуатации оборудования калийной отрасли, можно отметить, что применение защитных коррозионно-износостойких покрытий, нанесенных на менее дорогостоящую основу, в ряде случаев будет более экономичным, чем

применение монолитных высоколегированных сталей. Кроме того, металлические покрытия позволяют восстанавливать изношенные поверхности и, следовательно, снизить потребности в запасных частях.

На сегодняшний день существуют различные способы напыления газотермических покрытий, позволяющих увеличить ресурс деталей машин в несколько раз. Одним из перспективных и экономически предпочтительных способов нанесения металлических покрытий является способ гиперзвуковой металлизации (ГМ) [1], при котором в качестве материалов применяются стандартные сварочные проволоки и проволоки специального назначения.

Следует отметить, что процесс газотермического напыления покрытий с применением проволок значительно отличается условиями плавления и соединения от процессов сварки и наплавки. Напыленное покрытие обладает значительно меньшей прочностью сцепления по сравнению с наплавленными. Исходя из оценки работоспособности деталей с покрытиями, очевидно, что прочность сцепления покрытий с основным металлом является одним из важных факторов, характеризующих возможность применения металлических покрытий.

В связи с этим весьма актуальной является задача подбора соответствующих условиям эксплуатации коррозионно-износостойких материалов и поиск способов увеличения прочности сцепления газотермических покрытий, применяемых в калийной отрасли.

Подбор материалов и исследование особенностей их применения. Для подбора коррозионно-стойких материалов были проведены коррозионные промышленные испытания [2] металлических покрытий из высоколегированных проволок различных структурных классов, нанесенных методом ГМ на стальные пластины марки Ст 3 размерами $80 \times 40 \times 5$ мм. Образцы были размещены в водном растворе KCl и NaCl на технологической линии ОАО «Беларуськалий». По результатам испытаний образцов было установлено, что покрытия из высоколегированных стальных проволок ER316LSi и ER2209, содержащих молибден (2,6 %...3,3 %), являются наиболее коррозионно-стойкими в растворах KCl и NaCl по сравнению с покрытиями из высоколегированных хромистых и хромоникелевых стальных проволок, не содержащих молибден. Рабочий ресурс данных покрытий до начала разрушения составил 2–3 месяца, после которого за счет эрозионного износа от твердой фракции, содержащейся в испытательной среде, они были повреждены (рис. 1).

Кроме коррозионных испытаний покрытий в жидких средах, были проведены промышленные испытания быстроизнашиваемых деталей с защитными покрытиями, эксплуатирующихся в менее агрессивных условиях. Так, например, ресурс стальной втулки защитной перекачивающего технологические среды насоса, упрочненной покрытием, нанесенным методом ГМ с применением высоколегированной проволоки ER316LSi, был увеличен более чем в 2 раза. В качестве защитных и износостойких покрытий не плохо зарекомендовали себя покрытия из проволоки 95X18. Применение покрытий из проволоки Св-08Г2С позволило решить проблемы ограниченности ремонта посадочных подшипниковых мест корпусных элементов редукторов, связанных с ограниченностью

применения сварки и наплавки по причине структурных изменений и образования остаточных деформаций.

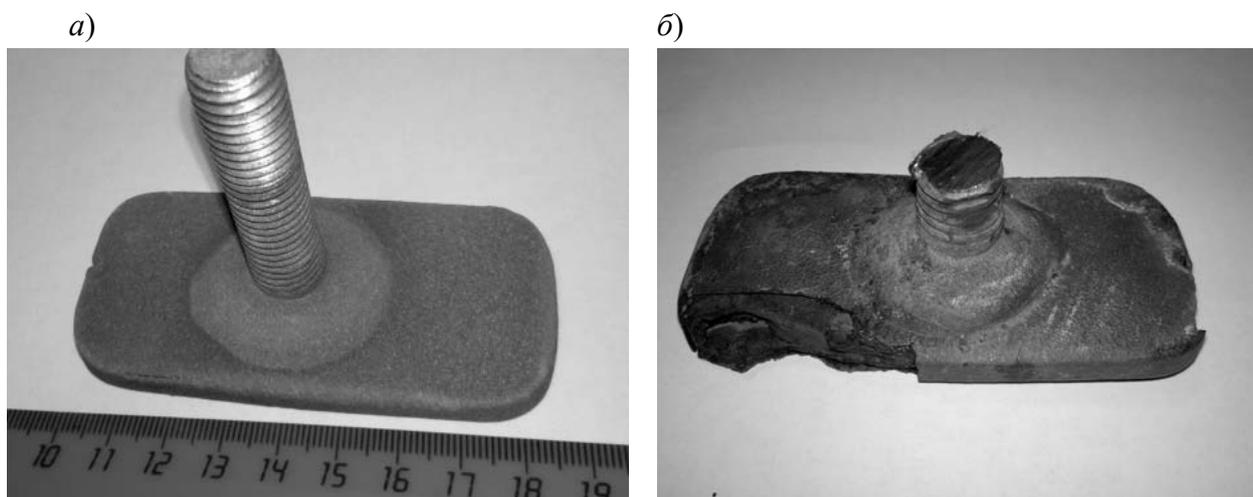


Рис. 1. Образец с покрытием из проволоки ER316LSi: *а* – до испытаний; *б* – после трех с половиной месяцев испытаний

В процессе напыления защитных покрытий было замечено, что подбор оптимальных режимов и техника напыления покрытий являются немаловажным фактором, влияющим на прочность сцепления, пористость и шероховатость покрытий [3].

По результатам испытаний прочности сцепления покрытий и металлографических исследований были определены оптимальные параметры режима напыления покрытий из высоколегированной проволоки ER316LSi. При напылении покрытий на параметрах выше оптимальных наблюдалось уменьшение прочности сцепления покрытий (рис. 2) по причине возникновения чрезмерных остаточных напряжений, увеличение пористости и уменьшение шероховатости покрытий.

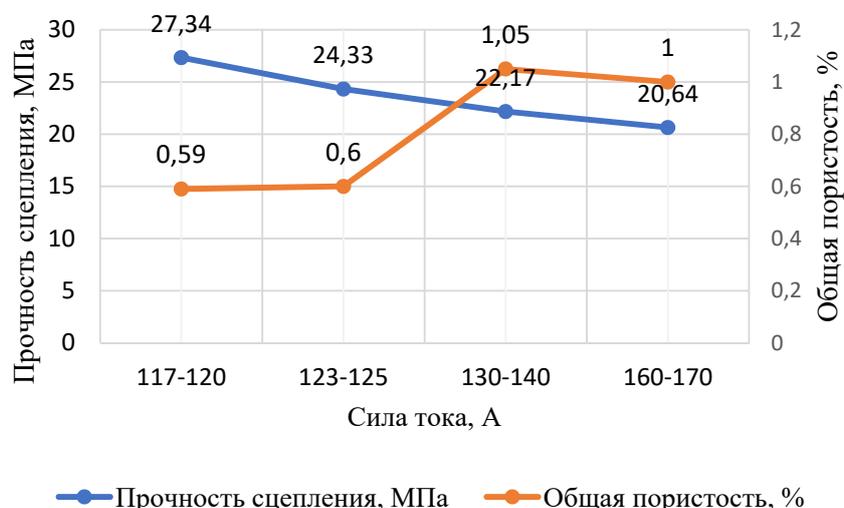


Рис. 2. Изменение прочности сцепления и общей пористости покрытий при изменении параметров напыления

Для повышения прочности сцепления газотермических покрытий необходимо было определить их фактическую прочность. Для этого по специально разработанной методике испытаний были проведены испытания прочности сцепления покрытий из различных проволочных материалов (рис. 3).

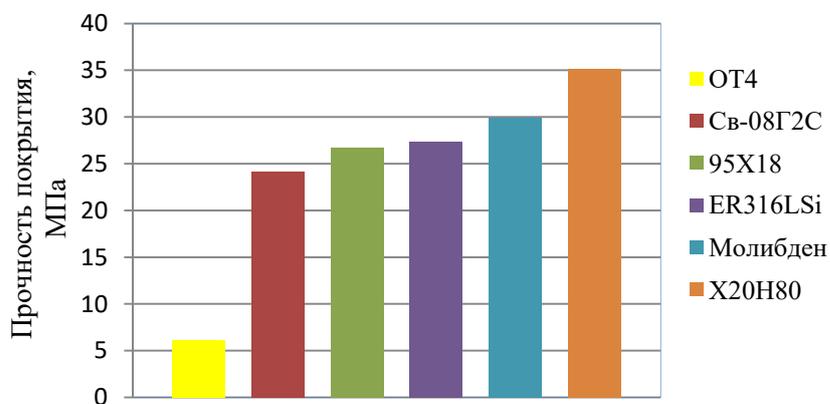


Рис. 3. Прочность покрытий из различных проволочных материалов

Известно, что прочность покрытий пропорциональна их адгезионной и когезионной прочности. Величина адгезионной прочности зависит от механического, физического и химического взаимодействия между частицами и подложкой. Когезионная прочность зависит от взаимодействия частиц между собой, фазового, химического состава и размера зерна напыленного слоя, пористости покрытия.

Разрушение покрытия может происходить, если внешние нагрузки или остаточные напряжения превысят его прочность. В случае превышения адгезионной прочности будет иметь место отслоение покрытия, когезионной прочности – растрескивание или отделение слоев покрытия.

Учитывая, что адгезионная и когезионная составляющие прочности покрытий зависят от различных факторов, для определения способов повышения прочности покрытий необходимо определить их соотношение. С этой целью были выполнены механические испытания и металлографические исследования покрытий из различных материалов [4, 5], по результатам которых были определены доля участия когезионной и адгезионной составляющих прочности покрытий (рис. 4) и составляющая, требующая увеличения.

Для увеличения прочности сцепления покрытий из низколегированной проволоки Св-08Г2С и высоколегированных проволок 95Х18 и ER316LSi требуется увеличение адгезионной составляющей; для покрытий из нихрома, молибдена и титана – когезионной.

Увеличение прочности сцепления покрытий. Учитывая, что в прочности покрытий из наиболее применяемых проволок Св-08Г2С, 95Х18 и ER316LSi преобладает когезионная составляющая, для увеличения прочности покрытий из этих проволок, наряду с механической подготовкой основы, требуется улучшение физического и химического взаимодействия между частицами и подложкой, которое можно достичь путем уменьшения оксидных пленок на

поверхности основы и на поверхности расплавленных капель. В связи с чем в качестве эксперимента были разработаны и применены самофлюсующиеся проволоки [6]. Самофлюсующиеся проволоки представляли собой исходную стальную проволоку марок Св-08Г2С, 95Х18, 316LSi с поверхностным боридным слоем.

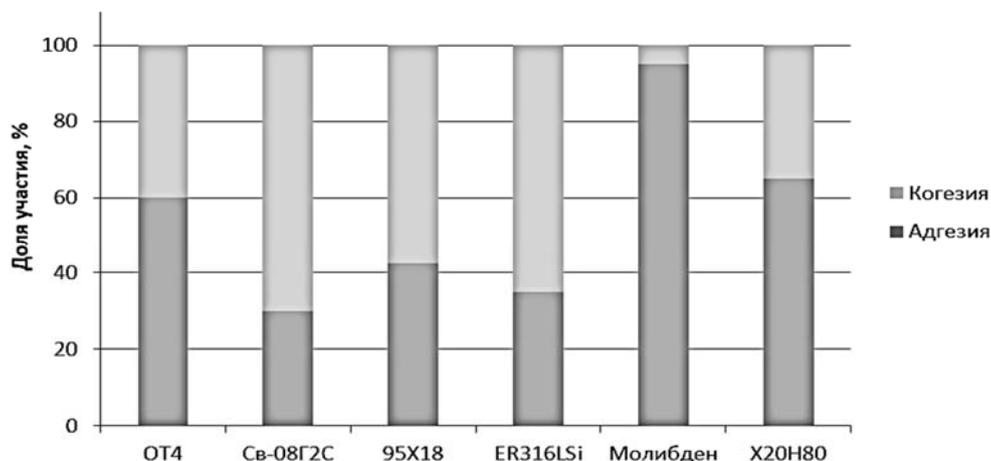


Рис. 4. Доля участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий из различных материалов

По результатам исследования особенностей применения самофлюсующихся проволок и покрытий из них было установлено, что в покрытии из борированной проволоки Св-08Г2С оксидов железа (FeO , Fe_3O_4) не обнаружено (рис. 5), в покрытии из борированных проволок 95Х18 и ER316LSi оксиды железа выявлены в меньшем количестве по сравнению с исходной проволокой.

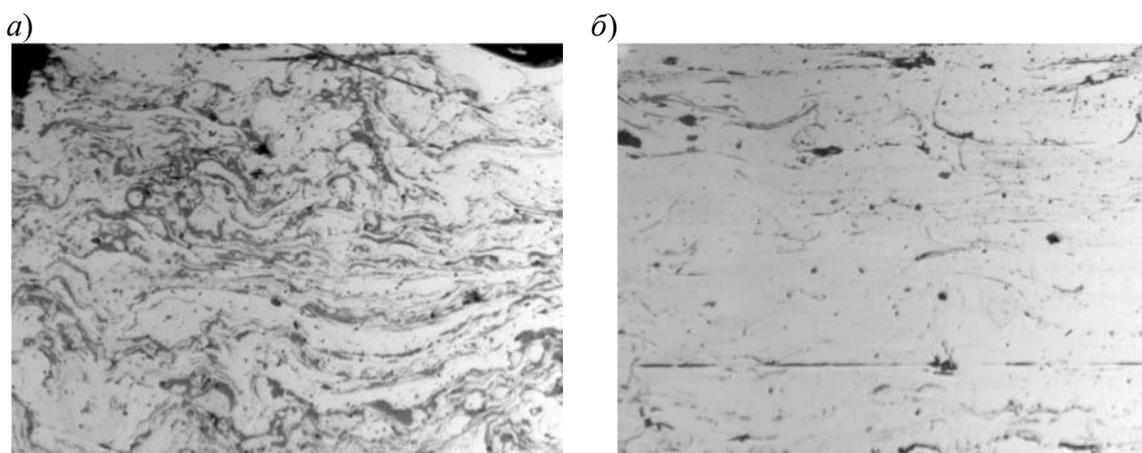


Рис. 5. Микроструктура покрытий из проволоки Св-08Г2С, увеличение $\times 500$: а – исходная проволока; б – борированная проволока

Уменьшение оксидов (FeO , Fe_3O_4) при использовании борированной проволоки привело к увеличению прочности сцепления покрытий по сравнению с исходными проволоками: для Св-08Г2С – на 37 %, для 95Х18 и ER316LSi –

на 3 %. Кроме увеличения прочности покрытий, при использовании борированных проволок Св-08Г2С и 95Х18 было отмечено увеличение микротвердости покрытий, по сравнению с исходной, на 76 % и 22 % соответственно. В то же время по причине структурных изменений микротвердость борированной проволоки ER316LSi уменьшилась на 3 %. Увеличение микротвердости покрытий из борированных проволок Св-08Г2С и 95Х18 позволяет увеличить износостойкость этих покрытий.

Было установлено, что применение самофлюсующихся материалов для упрочнения и восстановления деталей машин является более предпочтительным, чем применение обычной проволоки.

Выводы.

1. Промышленные испытания защитных газотермических покрытий в условиях ОАО «Беларуськалий» показали эффективность их применения. Одним из перспективных и экономически предпочтительных способов нанесения металлических покрытий является гиперзвуковая металлизация.

2. Выбор проволок для защитных покрытий необходимо осуществлять с учетом особенностей их напыления и особенностей строения покрытий из них.

3. Увеличение адгезионной и когезионной составляющих в прочности покрытий может быть достигнуто подбором оптимальных режимов напыления покрытий для каждого применяемого материала, при этом оптимальные режимы не должны способствовать чрезмерному окислению расплавленного материала, выгоранию легирующих элементов и увеличению остаточных напряжений в покрытии.

4. Применение самофлюсующихся стальных проволок с поверхностным борсодержащим слоем для увеличения прочности сцепления, износостойкости и коррозионной стойкости покрытий является перспективным направлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: пат. 024778 / М. А. Белоцерковский, А. А. Дюжев, А. С. Прядко, А. Е. Черепко, В. А. Скворцов, А. В. Сосновский. – Оpubл. 31.10.2016.

2. Исследование коррозионной стойкости покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации из высоколегированных проволочных материалов, в контакте с агрессивными средами, используемыми при производстве калийных удобрений / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 3. – С. 76–85.

3. Влияние режимов гиперзвуковой металлизации на прочность сцепления металлических покрытий / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 11. – С. 31–36.

4. Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. – 2021. – № 20 (6). – С. 459–464.

5. **Карпец, М. Н.** Особенности нанесения стальных и титановых покрытий с применением гиперзвуковой металлизации / М. Н. Карпец, А. В. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов ОИМ НАН Беларуси. – 2022. – № 2 (59). – С. 62–66.

6. **Карпец, М. Н.** Особенности применения самофлюсующихся стальных проволок для напыления металлических покрытий / М. Н. Карпец // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 2. – С. 32–39.

УДК 621.791.754

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА В НЕОДНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

В. А. КАРХИН¹, Я. АЛДАИЕ¹, Е. Б. СТАРОБИНСКИЙ¹, А. М. ЛЕВЧЕНКО²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ООО «Учебный Научно-Технический Центр «Сварка» Национального Агентства Контроля Сварки
Санкт-Петербург, Россия

UDC 621.791.754

ANALYSIS OF HYDROGEN DISTRIBUTION IN HETEROGENEOUS WELDED JOINTS

V. A. KARKHIN, Y. ALDAIEE, E. B. STAROBINSKII, A. M. LEVCHENKO

Аннотация. Приведено аналитическое решение одномерной задачи диффузии водорода в разнородных стыковых соединениях с учетом глубины проплавления, толщины соединения, коэффициентов диффузии, растворимостей и начальных концентраций водорода в металле шва и основном металле. Рассмотрено распределение водорода по толщине соединения с ферритным и аустенитным швом и ферритным и мартенситным основным металлом. Показано, что максимальная концентрация водорода в ЗТВ определяется только отношениями коэффициентов диффузии и растворимостей водорода в шве и основном металле.

Ключевые слова: водород, сварное соединение, задача диффузии, неоднородность, коэффициент диффузии, растворимость.

Abstract. The analytical solution of the one-dimensional problem of hydrogen diffusion in heterogeneous butt-joints taking into account the penetration depth, joint thickness, diffusion coefficients, solubilities and initial hydrogen concentrations in the weld metal and base metal is given. The distribution of hydrogen over thickness of joint with ferritic and austenitic weld metal and ferritic and martensitic base metal is considered. It is shown that the maximum concentration of hydrogen in HAZ is determined only by the ratio of diffusion coefficients and solubilities of hydrogen in weld and base metal.

Keywords: hydrogen, welded joint, diffusion problem, heterogeneity, diffusion coefficient, solubility.

Введение. Одним из основных факторов образования холодных трещин является диффузионный водород. Именно поэтому эти трещины в современной научной литературе называются «индуцированные водородом холодные трещины» (ИВХТ). Для оценки вероятности образования ИВХТ по критериям прочности требуются исходные данные о локальной концентрации диффузионного водорода в опасных зонах сварного соединения, прежде всего в зоне термического влияния (ЗТВ) у границы шва, где наиболее вероятно образование трещин.

Согласно ГОСТ 34061–2017 существующие методы (ртутный, вакуумный, хроматографический) позволяют определить после сварки только среднюю концентрацию диффузионного водорода в металле шва (МШ) и наплавленном металле. Для оценки распределения водорода в МШ, ЗТВ и основном металле (ОМ) используются расчетные методы. Разработаны достаточно полные модели

диффузии водорода в металлах, ориентированные на применение численных методов решения задач диффузии. Достоинство численных методов – принципиальная возможность реализации физической модели, а их недостаток – сложность вычислительных алгоритмов, большая продолжительность решения отдельной задачи и сложность обобщения полученных результатов. Достоинство методов математического анализа – быстрота расчета полей концентрации и представление результатов расчета в обобщенном виде, а основной недостаток – необходимость существенного упрощения физической модели, чтобы получить решение задачи в виде формул.

Цель исследования – разработка приближенной аналитической модели диффузии водорода с учетом содержания водорода в МШ и ОМ после сварки, размеров шва и сварного соединения, неоднородного по коэффициенту диффузии и растворимости водорода. Приводится аналитическое решение задачи диффузии и анализируется влияние основных факторов на распределение водорода вблизи границы шва.

Модель диффузии водорода.

Примем следующие допущения:

- сварное соединение состоит из двух материалов, отличающихся по соответствующим коэффициентам диффузии D_1 и D_2 и растворимости водорода S_1 и S_2 , причем граница раздела материалов неподвижна (индекс 1 относится к МШ, а индекс 2 – к ЗТВ и ОМ) (рис. 1, а);
- начальная концентрация водорода C_{01} и C_{02} равномерно распределена в пределах каждого материала;
- на поверхности соединения концентрация водорода равна нулю, т. к. парциальное давление водорода в атмосфере мало;
- весь водород является диффузионным (отсутствуют ловушки водорода);
- поток водорода одномерный и направлен вдоль оси x перпендикулярно продольной оси шва (см. рис. 1). Это допущение приводит к завышению концентрации водорода.

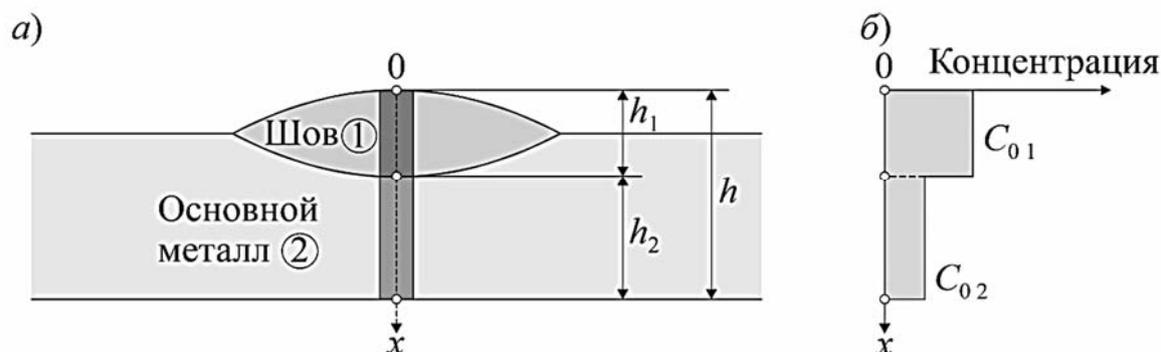


Рис. 1. Схема сварного соединения: а – координатная система; б – распределение начальной концентрации водорода

Принятым физическим допущениям соответствует следующая постановка линейной краевой задачи диффузии водорода.

Уравнения переноса

$$\frac{\partial C_1(x,t)}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1(x,t)}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < h_1; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2(x,t)}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2(x,t)}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad h < x < h. \quad (2)$$

Начальные условия ($t = 0$) (см. рис. 1, б)

$$C_1(x,0) = C_{01}; \quad (3)$$

$$C_2(x,0) = C_{02}. \quad (4)$$

Граничные условия (см. рис. 1, а)

$$C_1(0,t) = 0; \quad (5)$$

$$C_2(h,t) = 0. \quad (6)$$

На границе раздела материалов ($x = h_1$) постоянны поток водорода и константа равновесия согласно закону распределения Нернста:

$$D_1 \frac{\partial C_1(h,t)}{\partial x} = D_2 \frac{\partial C_2(h_1,t)}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\frac{C_2(h_1,t)}{C_1(h_1,t)} = \frac{S_2}{S_1} = k_s. \quad (8)$$

Задача (1)–(8) решена методом интегрального преобразования [1]:

$$C_1(x,t) = k_s^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} [(C_{01} A_n + C_{02} B_n) \sin(\beta_n h_2) \sin(k_D^{1/2} \beta_n x) \exp(-D_2 \beta_n^2 t)]; \quad (9)$$

$$C_2(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} [(C_{01} A_n + C_{02} B_n) \sin(k_D^{1/2} \beta_n h_1) \sin(\beta_n (h-x)) \exp(-D_2 \beta_n^2 t)]; \quad (10)$$

$$A_n = \frac{2 \sin(\beta_n h_2)}{k_D^{1/2} \beta_n} \frac{1 - \cos(k_D^{1/2} \beta_n h_1)}{h_2 \sin^2(k_D^{1/2} \beta_n h_1) + k_s^{-1} h_1 \sin^2(\beta_n h_2)};$$

$$B_n = \frac{2 \sin(k_D^{1/2} \beta_n h_1)}{\beta_n} \frac{1 - \cos(\beta_n h_2)}{h_2 \sin^2(k_D^{1/2} \beta_n h_1) + k_s^{-1} h_1 \sin^2(\beta_n h_2)};$$

$$k_D = D_2 / D_1,$$

где β_n – положительные корни уравнения

$$\operatorname{ctg}(\beta h_2) + \frac{1}{k_s k_D^{1/2}} \operatorname{ctg}(k_D^{1/2} \beta h_1) = 0.$$

При этом предполагается, что $k_D^{1/2} \frac{h_1}{h_2}$ не является несократимой рациональной дробью [1].

Обсуждение результатов исследования. Зона термического влияния наиболее склонна к образованию холодных трещин, которые образуются при наличии диффузионного водорода, закалочной микроструктуры, растягивающих напряжений и температуры ниже 500 К. Концентрация водорода в ЗТВ зависит от многих параметров: начального содержания водорода C_{01} и C_{02} , высоты h_1 и h_2 , коэффициентов диффузии D_1 и D_2 , растворимостей S_1 и S_2 .

На рис. 2 показана кинетика концентрации водорода на границе шва со стороны основного металла. Границы варьирования безразмерных параметров k_D , k_s , k_c и k_h различаются на 2 порядка.

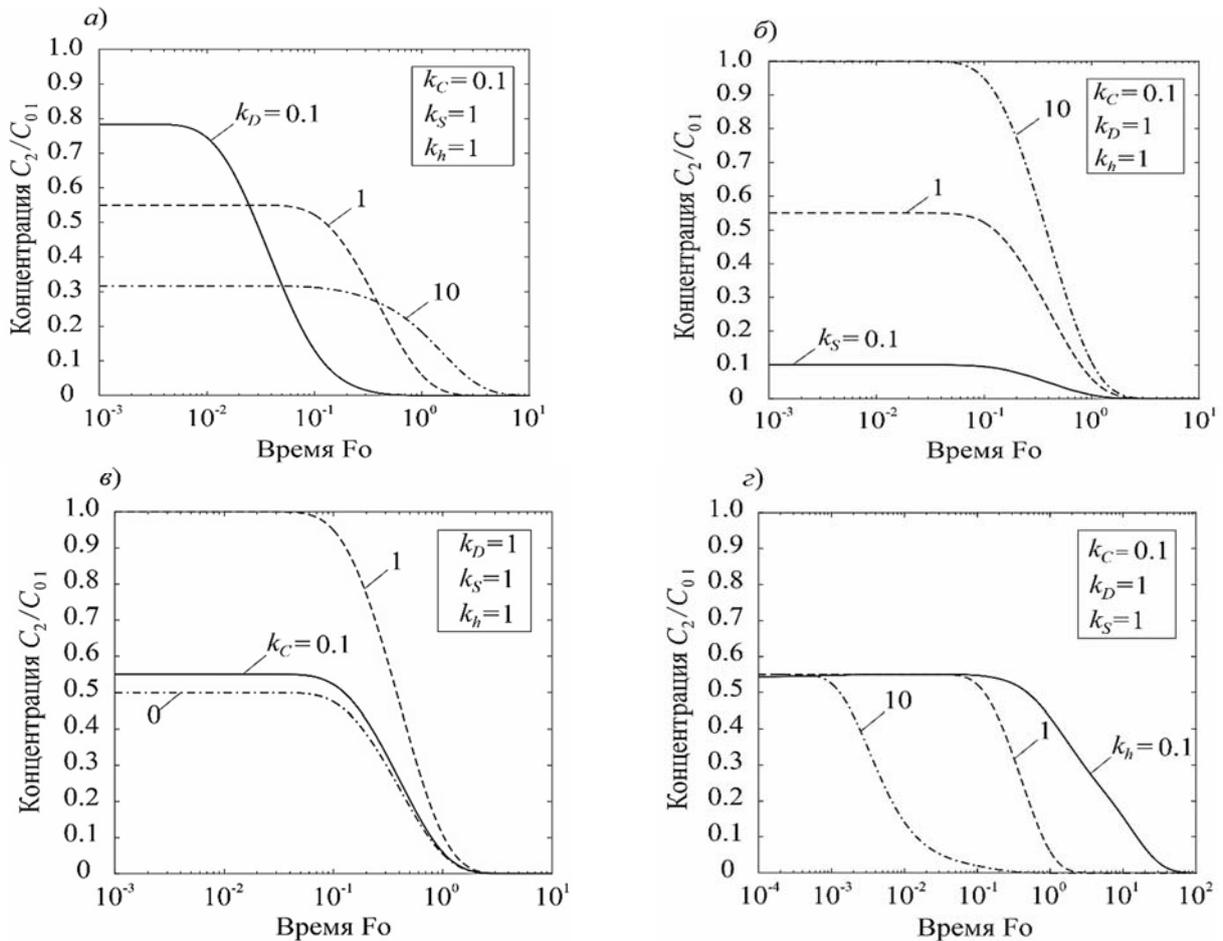


Рис. 2. Изменение относительной концентрации C_2/C_{01} в ЗТВ на границе шва ($x = h_1$) в зависимости от безразмерного времени $F_0 = D_2 t / h_2^2$ и показателей неоднородности: $k_D = D_2 / D_1$ (а); $k_s = S_2 / S_1$ (б); $k_c = C_{02} / C_{01}$ (в); $k_h = h_2 / h_1$ (з)

Рассмотрим диффузию водорода в сварных соединениях, состоящих из комбинаций материалов различных типов: низколегированная низкоуглеродистая сталь (условно назовем ферритом F), среднелегированная сталь (условно назовем мартенситом M) и аустенитная сталь (условно назовем аустенитом A). В качестве F примем сталь 1020 (0,17 %...0,23 % C, 0,30 %...0,60 % Mn), M – сталь 2,25 Cr – 1 Mo (max 0,15 % C, 2 %...2,5 % Cr, 0,9 %...1,10 % Mo, 0,3 %...0,6 % Mn) и A – сталь AISI 304 (\leq 0,08 % C, 18 %...20 % Cr, 8 %...12 % Ni). В табл. 1 приведены коэффициенты диффузии и растворимости водорода в этих сталях при температуре 293 К. Видно, что в мартенсите M коэффициент диффузии на порядок меньше, чем в феррите F , но на 4 порядка больше, чем в аустените A . В феррите и мартенсите растворимость отличается мало, т. к. у них общая ОЦК-решетка, а растворимость водорода в ГЦК-решетке (A) на 3 порядка больше, чем в ОЦК-решетке (F и M).

Табл. 1. Коэффициент диффузии водорода D и растворимость S водорода в сталях при температуре 293 К

	1020 (F)	2,25 Cr – 1 Mo (M)	304 (A)
$D, \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	$2,085 \cdot 10^{-9}$ [2]	$2,180 \cdot 10^{-10}$ [2]	$1,258 \cdot 10^{-14}$ [4]
$S, \text{ ppm}$	$8,262 \cdot 10^{-4}$ [3]	$7,184 \cdot 10^{-4}$ [4]	0,977 [3, 4]

Проанализируем диффузию водорода в сварных соединениях в следующих сочетаниях МШ – ОМ: $F + F$ ($D_1 = D_2, S_1 = S_2$), $F + M$ ($D_1 > D_2, S_1 \approx S_2$), $A + M$ ($D_1 \ll D_2, S_1 \gg S_2$). Пусть высота шва $h_1 = 4$ мм, а толщина непроплавленной части основного металла $h_2 = 6$ мм.

В однородном сварном соединении $F + F$ поток водорода направлен из МШ в ОМ. Максимальная концентрация устанавливается в начальный момент и достигает величины $C_{2\text{max}}(h_1) = 0,5$ ($C_{01} = C_{02}$) (рис. 3, a). Через 6 ч после сварки практически весь диффузионный водород выделился. Характер кривых соответствует результатам экспериментов [5].

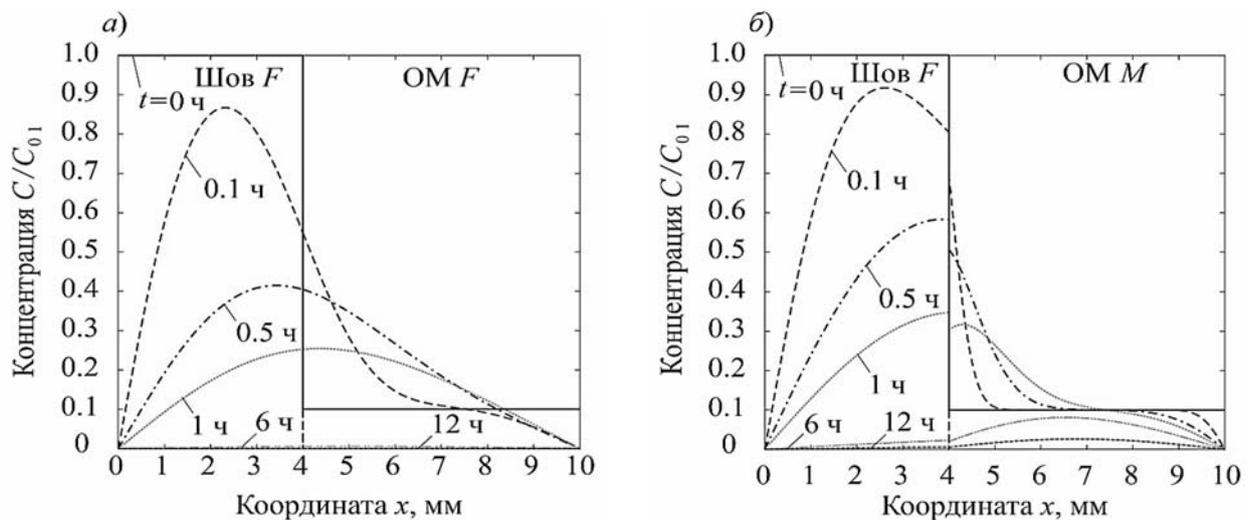


Рис. 3. Распределение относительной концентрации водорода в сварных соединениях в различные моменты времени t при $k_c = C_{02}/C_{01} = 0,1$: a – однородное соединение (ферритный шов F и ферритный основной металл F); b – разнородное соединение (ферритный шов F и мартенситный основной металл M)

В неоднородном соединении $F + M$ (рис. 3, б) водород выделяется через поверхность медленнее. Концентрация водорода в ЗТВ относительно высокая благодаря высокому коэффициенту D_1 (быстрому притоку водорода из шва) и низкому коэффициенту D_2 (медленному оттоку водорода в ОМ).

В ЗТВ соединения $A + M$ $C_{2\max} \leq C_{02}$, т. е. водород диффундирует из ОМ в шов (рис. 4, а). Это явление диффузии наглядно проявляется, когда в аустенитном шве и мартенситном ОМ начальная концентрация одинаковая, $C_{01} = C_{02}$ (рис. 4, б). Несмотря на отсутствие перепада концентрации на границе, из-за большей растворимости в МШ водород диффундирует из ОМ и накапливается в МШ вблизи границы шва (см. рис. 4, б), где его концентрация долго сохраняется. Локальное резкое повышение концентрации на границе аустенитного шва ранее наблюдали экспериментально [5].

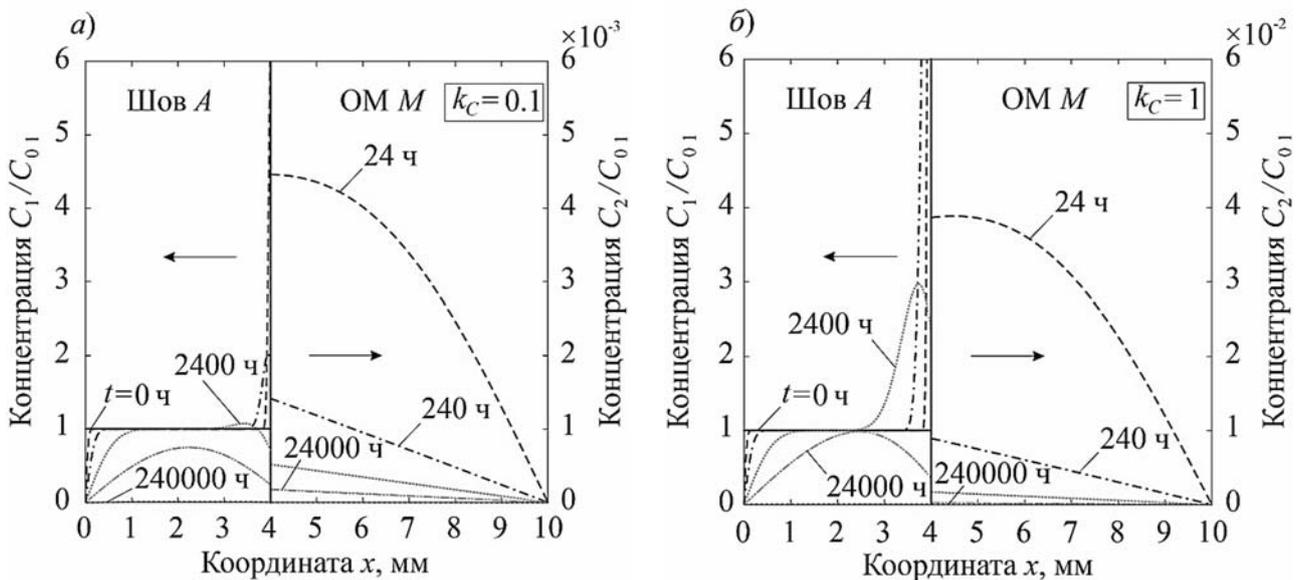


Рис. 4. Распределение относительной концентрации водорода в разнородном соединении (аустенитный шов A и мартенситный основной металл M) в различные моменты времени t в основном металле: $k_c = C_{02}/C_{01} = 0,1$ (а); $k_c = 1$ (б)

При малых значениях времени границы соединения ($x = 0$ и $x = h$) слабо влияют на распределение водорода у границы шва ($x = h_1$), где его относительная максимальная концентрация $C_{2\max}(h_1)/C_{01}$ определяется только отношениями начальных концентраций $k_c = C_{02}/C_{01}$ растворимостей $k_s = S_2/S_1$ и коэффициентов диффузии $k_D = D_2/D_1$:

$$\frac{C_{2\max}(h_1)}{C_{02}} = k_c + \frac{k_s - k_c}{1 + k_s k_D^{1/2}}.$$

Для минимизации концентрации водорода в ЗТВ рекомендуется выбирать такие сварочные материалы, которые создают металл шва с более низким коэффициентом диффузии D_1 и более высокой растворимостью водорода S_1 , чем в основном металле. Использование аустенитных сварочных материалов при сварке неаустенитной стали является идеальным вариантом.

Выводы.

1. Полученное аналитическое решение одномерной задачи диффузии позволяет рассчитывать распределения водорода в неоднородном сварном соединении с учетом глубины проплавления и толщины соединения, коэффициентов диффузии, растворимостей и начальных концентраций водорода в металле шва и основном металле.

2. Максимальная концентрация водорода в ЗТВ определяется только отношениями начальных концентраций, коэффициентов диффузии и растворимостей водорода в шве и основном металле.

3. Для минимизации концентрации водорода в ЗТВ рекомендуется выбирать такие сварочные материалы, которые создают металл шва с более низким коэффициентом диффузии и более высокой растворимостью водорода, чем в основном металле.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – Москва: Наука, 1964. – 488 с.

2. **Кархин, В. А.** Коэффициент диффузии водорода в свариваемых сталях / В. А. Кархин, Я. Алдаие, А. М. Левченко // Сварка и диагностика. – 2021. – № 6. – С. 20–27.

3. **Алдаие, Я.** Растворимость водорода в свариваемых сталях / Я. Алдаие, В. А. Кархин, А. М. Левченко // Сварка и диагностика. – 2022. – № 3. – С. 25–31.

4. **Pillot, S.** Hydrogen-induced disbonding and embrittlement of steels used in petrochemical refining / S. Pillot, L. Coudreuse // Gangloff R., Somerday B. (eds.). Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies. – Cambridge: Woodhead, 2012. – P. 51–93.

5. **Million, A.** L'hydrogène dans les aciers et dans les joints soudés / A. Million, C. Million. – Paris: Dunod, 1971. – 371 p.

E-mail: victor.karkhin@mail.ru; aldaiee.yarob@gmail.com; st.eb@ailurus.ru; info@rszmas.ru.

УДК 621.791

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ НА МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. С. КЛИМОВ, А. Н. АНЦИБОРОВ

Тольяттинский государственный университет

Тольятти, Россия

UDC 621.791

INCREASING THE EFFICIENCY OF RESISTANCE WELDING ON AC MACHINES

A. S. KLIMOV, A. N. ANTSIBOROV

Аннотация. Предложены и апробированы методики оперативной оценки состояния питающей сети и оборудования для контактной сварки на переменном токе. Представлены алгоритмы для определения энергетических характеристик (ток, сопротивление, энерговыделение) по параметрам фазового регулирования. Приведены примеры промышленного применения.

Ключевые слова: контактная сварка, автоматизация, контроль и диагностика, электрические параметры.

Abstract. Methods for the operational assessment of the state of the supply network and equipment for resistance welding on alternating current are proposed and tested. Algorithms for determining the energy characteristics (current, resistance, energy release) by the parameters of phase control are presented. Examples of industrial applications are given.

Keywords: resistance welding, automation, control and diagnostics, electrical parameters.

В настоящее время отечественный производитель находится в сложнейших условиях конкуренции с иностранными (западными и азиатскими) предприятиями, повышения закупочной цены оборудования и комплектующих к нему, кадрового и финансового голода, морального и физического устаревания оборудования [1, 2].

В 2021 г. в мире введено в эксплуатацию 86 тыс. машин для контактной сварки на общую сумму 1,4 млрд долл. США. К 2035 г. планируется увеличение объемов до 2 млрд долл. США. В России же совершенствование технологий производства осложняется физическим и (тем более) моральным устареванием оборудования (порядка 40 % оборудования для контактной сварки имеет срок службы более 20 лет). Кроме того, ощущается недостаток средств, выделяемых на научно-исследовательские разработки в области сварки и кадровую подготовку производства [3, 4].

В этих условиях задача повышения качества сварки решается за счет «прорывных» решений, позволяющих кратно повысить эффективность использования оборудования без существенных затрат на его изготовление и модернизацию.

Повышение эффективности оборудования для контактной сварки без затрат

на его глубокую модернизацию достигается совершенствованием методик контроля качества и систем управления. Для этого необходимо решить задачи оперативной диагностики состояния сварочного оборудования и питающей сети, моделирования электрических процессов в системе «машина – деталь», поиска параметров обратной связи, синтеза алгоритмов диагностики и управления.

Для оценки величины паразитных параметров питающей сети (активного сопротивления R_c и индуктивности L_c сети) предложена методика расчётного определения по результатам опыта короткого замыкания в режиме однофазного включения [5]. По осциллограмме напряжения (см. рис. 1) определяют: до коммутации – действующее напряжение сети на холостом ходу $U_{c,xx}$; в момент коммутации – провал напряжения ΔU ; после коммутации – действующее напряжение сети под нагрузкой $U_{c,св}$. По осциллограмме тока (см. рис. 1) определяют: в момент коммутации – скорость нарастания первичного тока dI_1/dt ; после коммутации – действующий первичный ток I_1 и угол φ_1 отставания тока от напряжения.

Индуктивность сети L_c вычисляется по провалу напряжения ΔU и скорости нарастания первичного тока dI_1/dt в момент коммутации t_k :

$$L_c = \Delta U / \frac{dI_1}{dt}. \quad (1)$$

Активное сопротивление сети R_c вычисляется как

$$R_c = \sqrt{\left(\frac{U_{c,xx}}{I_1}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1} \sin \varphi_1 + 2\pi f_c L_c\right)^2} - \frac{U_1}{I_1} \cos \varphi_1. \quad (2)$$

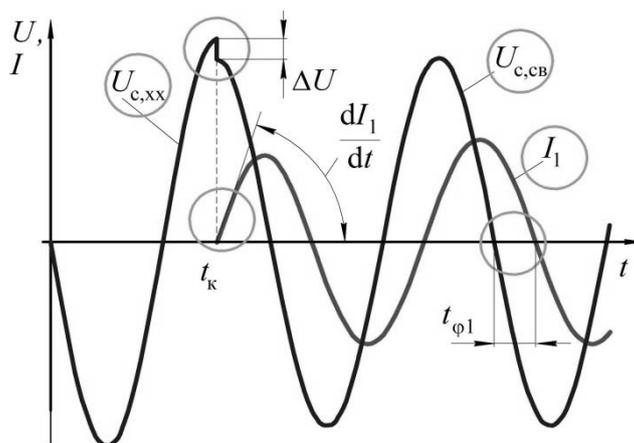


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения при однофазном включении

По известным паразитным параметрам сети может быть оценено её текущее состояние, принято решение на проведение корректировки параметров режима и калибровки канала измерения тока в регуляторе сварки.

Для повышения точности определения действующего сварочного тока I_2

при измерениях со стороны первичной обмотки трансформатора предложены способ и устройство (рис. 2), включающее датчик тока в первичном контуре 1, датчик наличия тока во вторичном контуре 2, нормирующую цепь датчика тока 3 и микроконтроллер 4 [6, 7].

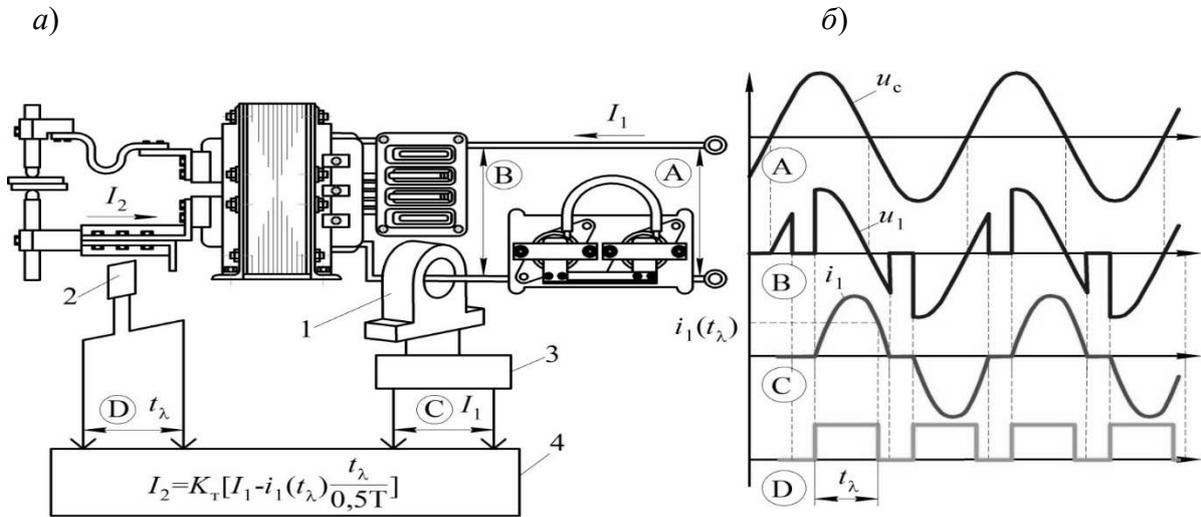


Рис. 2. Схема измерения вторичного тока (а) и диаграмма сигналов (б)

В процессе сварки измеряют действующее значение тока I_1 в первичном контуре, длительность t_λ импульса тока во вторичном контуре, мгновенное значение $i_1(t_\lambda)$ первичного тока i_1 в момент перехода вторичного тока через ноль (t_λ). Действующий вторичный ток рассчитывают как

$$I_2 = K_T \left[I_1 - i_1(t_\lambda) \frac{t_\lambda}{0,01} \right]. \quad (3)$$

Формула (3) является эмпирической, однако эффективность её применения доказана при сварке деталей кузова на многоэлектродных машинах, конструкция которых затрудняет установку датчика вторичного тока (рис. 3). Погрешность измерения тока не превышает 3% на области наиболее распространенных значений параметров фазового регулирования.

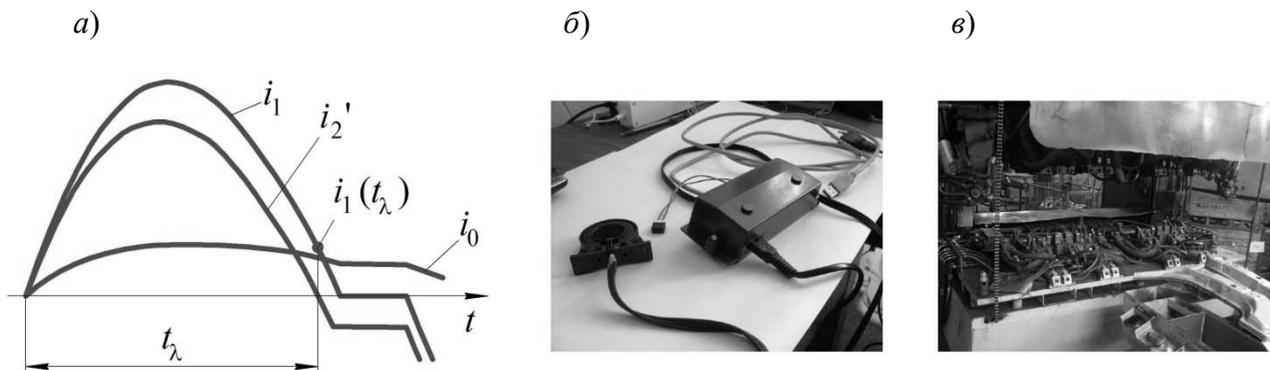


Рис. 3. Диаграммы мгновенных значений токов (а), измеритель сварочного тока (б) и контур многоэлектродной сварочной машины (в)

Для оценки состояния вторичного контура контактных машин предложена методика расчётного определения активного $R_{2к}$ и индуктивного $X_{2к}$ сопротивлений в режиме короткого замыкания [8, 9]. Для упрощения расчетов предложены регулировочные характеристики $k_i \cos \varphi$ и $k_i \sin \varphi$, значения которых могут быть определены для заданных углов α открытия и проводимости λ тиристоров. Для $\alpha = 90^\circ$ эл. эти характеристики могут быть аппроксимированы линейными двучленами:

$$k_i \cos \varphi = -0,497\lambda + 1,573; \quad (4)$$

$$k_i \sin \varphi = 0,642\lambda - 1,024. \quad (5)$$

При расчетах, согласно (4) и (5), погрешность аппроксимации не превышает 1,5 % на области наиболее распространённых значений параметров фазового регулирования. Отработку предлагаемой методики выполняли на многоэлектродной сварочной машине 503.651.421, установленной в цехе 1421 сборочно-кузовного производства автомобилей на платформе Kalina (рис. 4).

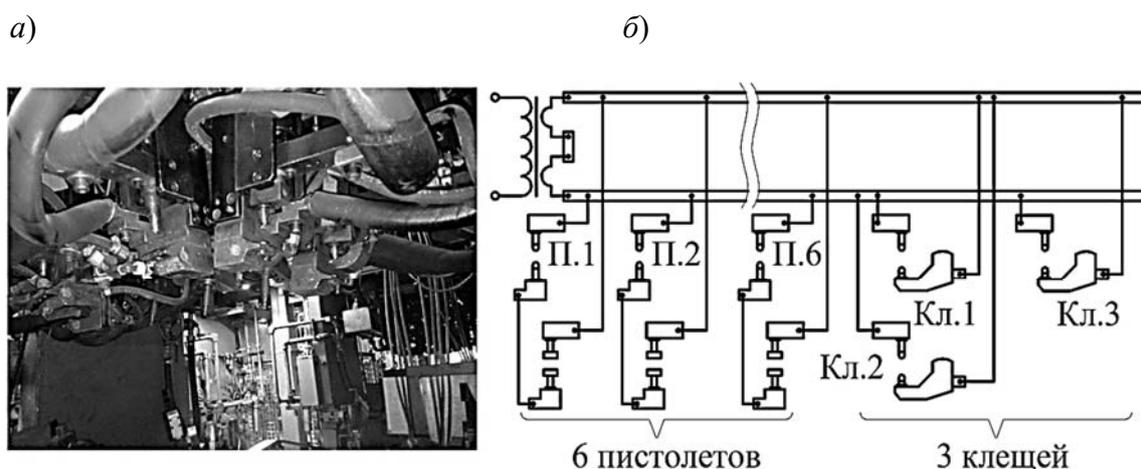


Рис. 4. Внешний вид (а) и схема вторичного контура (б) многоэлектродной сварочной машины 503.651.421

В течение 8 недель было сварено 100 тыс. деталей, при этом отслеживали динамику сопротивления $R_{2к}$ (рис. 5). За это время произошёл выход из строя перемычек в цепи сварочных пистолетов № 4 и 5, в цепи сварочных клещей № 1 и 2. Установлено, что переход перемычки в «пограничное состояние» может быть отслежен по увеличению скорости роста $R_{2к}$ до 40 мкОм в неделю. Так, на следующей неделе после прекращения замеров из строя вышли перемычки в контуре пистолетов № 1 и 2.

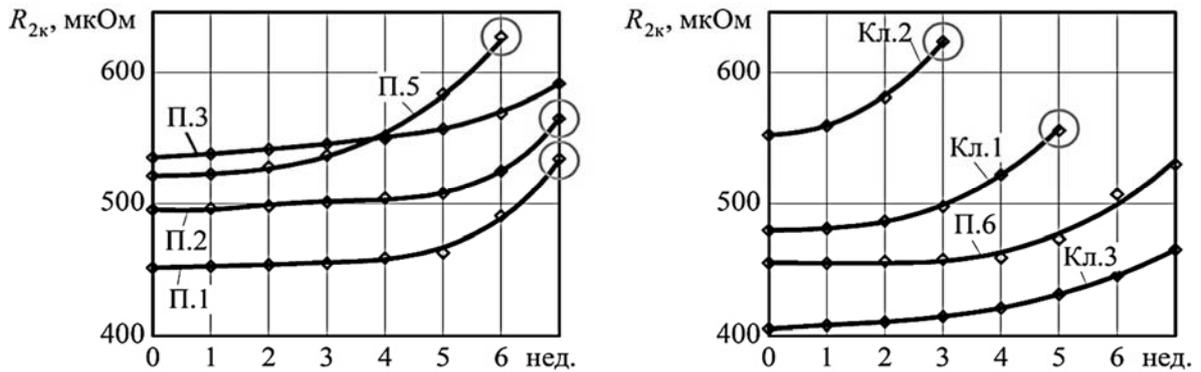


Рис. 5. Динамика сопротивления R_{2k} при продолжительной работе

С использованием математического и физического моделирования электрических процессов в системе «контактная машина – деталь» предложены и апробированы методики расчётного определения энергетических характеристик (ток сварки I_2 , сопротивление «электрод – электрод» $R_{ээ}$, энерговыделение $q_{ээ}$ между электродами) по параметрам фазового регулирования [10].

Предложенные методики были апробированы на промышленном сварочном оборудовании (машины МТ-1933, МР-8010). Погрешность расчетного определения вторичного тока I_2 составила 6 %, сопротивления участка «электрод – электрод» – 7 %, тепловыделения $q_{ээ}$ – 10 %. Была выполнена оптимизация параметров режима сварки топливного бака на машине МТ-1933 и топливного фильтра на машине МР-8010.

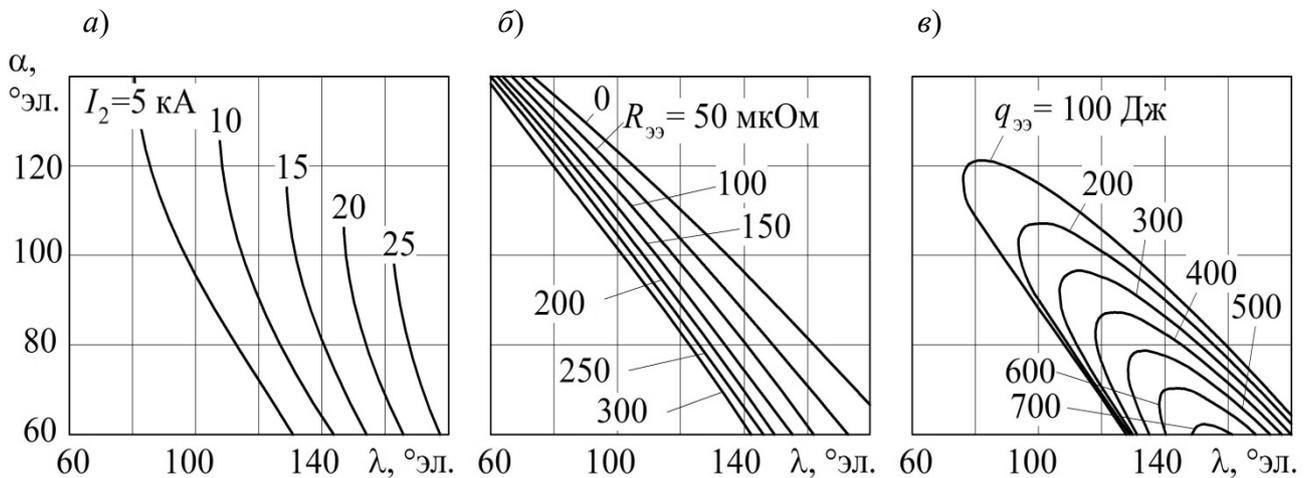


Рис. 6. Определение энергетических характеристик тока I_2 (а), сопротивления $R_{ээ}$ (б) и энерговыделения $q_{ээ}$ (в) по параметрам фазового регулирования для машины МР-8010 ($K_T = 78$)

Предложенные расчетные методики использованы в системе адаптивного управления контактной сваркой на базе регулятора PST.6250.100L (BOSCH REXROTH). Проведена апробация на машине МСМ 503.618.421 при сварке усилителя внутренней панели задней правой двери в сборе 1118-6201180 (для толщины 1,5 + 1,5 мм) и машине МСМ 503.651.421 при сварке наружной

панели задней левой двери в сборе 1118-6201013 (для толщины 0,8 + 0,8 мм) [11]. Установлено, что стабильное качество в условиях интенсивного износа электродов, колебания напряжения сети и сжимающего усилия на электродах обеспечивается до 2000 сварок. В то же время сварка с применяющейся ранее стабилизацией тока приводит к непроварам уже после выполнения 500 сварок (рис. 7).

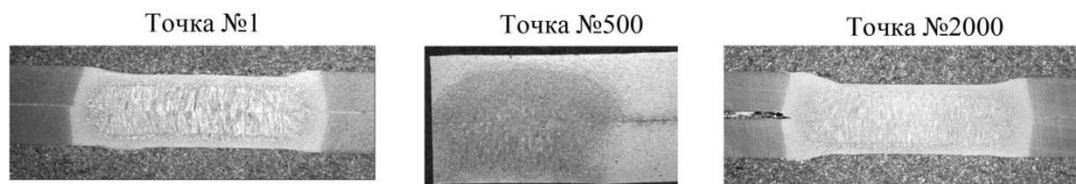


Рис. 7. Макроструктура соединения для толщины 1,5 + 1,5 мм при отсутствии возмущений (а); после выполнения 500 точек при стабилизации тока (б); после выполнения 2000 точек по предложенному алгоритму управления (в)

Таким образом, контактная сварка на переменном токе промышленной частоты имеет значительные резервы для повышения эффективности. Предложенные методики позволяют оперативно оценивать состояние питающей сети, износ длительно эксплуатируемых контактных машин, рассчитывать энергетические характеристики (ток, сопротивление «электрод – электрод» и энерговыделение), эффективно управлять сваркой в условиях возмущений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин, М. А. Научно-технический уровень сварочного производства в современной России / М. А. Лукин // Сварочное производство. – 2015. – № 12. – С. 31–36.
2. Lee, S. Statistical Analysis of Korean Welding Industry (VI) / S. Lee, C. Kim // Journal of Welding and Joining. – 2019. – № 2. – P. 66–69.
3. Ощепков, Ф. Н. Современный рынок сварочного оборудования: проблемы и перспективы / Ф. Н. Ощепков // Сварка и диагностика. – 2013. – № 5. – С. 62–63.
4. Лукин, М. А. Научно-технический уровень сварочного производства в современной России / М. А. Лукин // Сварочное производство. – 2015. – № 12. – С. 31–36.
5. Климов, А. С. Влияние параметров сети на точность управления и диагностики контактной сварки / А. С. Климов, А. К. Кудинов, В. С. Климов // Вестн. машиностроения. – 2021. – № 6. – С. 46–52.
6. Способ измерения сварочного тока: пат. РФ 2424096 / А. С. Климов, А. К. Кудинов, В. С. Климов, А. Н. Анциборов // Бюл. № 20. Кл. В23К11/24. – 2011.
7. Способ измерения тока при контактной сварке / А. С. Климов [и др.] // Сварочное производство. – 2012. – № 10. – С. 46–49.
8. Контроль состояния вторичных контуров контактных машин в условиях массового производства / А. Н. Анциборов [и др.] // Сварочное производство. – 2019. – № 6. – С. 20–25.
9. Способы измерения активного и реактивного сопротивлений сварочного контура контактных машин / А. Н. Анциборов [и др.] // Вестн. машиностроения. – 2019. – № 3. – С. 71–76.
10. Продолжительность включенного состояния тиристорov как параметр обратной связи в системах автоматического управления контактной точечной сваркой / А. С. Климов [и др.] // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 17–22.
11. Идентификация технологического процесса контактной сварки как объекта управления в условиях массового производства узлов кузова автомобиля / Э. А. Гладков [и др.] // Сварка и Диагностика. – 2020. – № 6. – С. 31–36.

УДК 621.791

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ И АРМИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Н. В. КОБЕРНИК

Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана
Москва, Россия

UDC 621.791

MODERN APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF FLUX-CORRECT WIRES FOR MODIFICATION AND REINFORCEMENT OF WELDED METAL

N. V. KOBERNIK

Аннотация. Показаны подходы к модифицированию, комплексному легированию и армированию металла тугоплавкими частицами карбидов. Рассматриваемые частицы вносили в наплавленный металл при помощи разработанных порошковых проволок. Установлено, что введение частиц карбида титана как в сварной шов, так и в наплавленный металл системы Fe–Cr–C благоприятно влияет на структуру и функциональные свойства.

Ключевые слова: сварка, наплавка, порошковые проволоки, карбиды.

Abstract. Approaches to the modification, complex alloying and reinforcement of metal with refractory carbide particles are shown. The considered particles were introduced into the deposited metal using the developed flux-cored wires. It has been repaired that the introduction of titanium carbide particles both into the weld and into the deposited metal of the Fe–Cr–C system favorably affects the structure and functional properties.

Keywords: welding, surfacing, flux-cored wires, carbides.

В сварочном производстве большое внимание уделяется формированию структуры наплавленного металла как функциональных покрытий, так и сварных швов. Одним из важнейших направлений является формирование тугоплавких соединений карбидов, оксидов, интерметаллидов и т. д. в структуре наплавленного металла, которые могут формироваться с помощью отдельного или комплексного легирования. В случае отдельного легирования наплавленный металл легируют химическими элементами в таком количестве, чтобы обеспечить формирование тугоплавких соединений в наплавленном металле. При комплексном легировании в наплавленный металл вводят готовые тугоплавкие соединения.

В зависимости от размера сформированных частиц карбидов могут реализовываться различные механизмы воздействия на структуру и свойства

наплавленного металла. Так, при размере вводимых частиц, находящихся в ультрадисперсном диапазоне, реализуется процесс модифицирования металлов и сплавов, где тугоплавкие частицы выступают в роли центров кристаллизации. Увеличение размеров частиц до микронного и даже миллиметрового диапазона приводит к армированию металлов и сплавов. Хорошо известен подход, при котором в наплавленный металл вводят тугоплавкие частицы миллиметрового диапазона для получения покрытий, стойких к абразивному износу.

В работе рассмотрены вопросы комплексного легирования наплавленного металла через шихту порошковой проволоки при выполнении сварки и наплавки.

Известно, что при комплексном легировании наплавленного металла основными проблемами являются термодинамическая и кинетическая совместимость тугоплавких соединений с матрицей. Поэтому для сохранения тугоплавких частиц и повышения доли их перехода в наплавленный металл необходимо снизить их перегрев и ограничить их время пребывания при высоких температурах. Для достижения указанной цели предложено вводить тугоплавкие частицы в составе присадочного материала, при этом снижается время контакта частиц с высокотемпературной дугой, а при введении присадочной проволоки в хвостовую часть сварочной ванны и вовсе его предотвратить.

В работе предложено модифицирование металла шва сварных соединений из низкоуглеродистых сталей ультрадисперсными частицами карбида вольфрама, оксида алюминия, нитрида титана и карбида титана.

Исследование процесса модифицирования металла шва изучали при сварке под флюсом с подачей присадочной порошковой проволоки, в шихту которой вводили 2,5 масс. % композиционных гранул. Композиционные гранулы получали при совместной обработке порошка железа или никеля с ультрадисперсными частицами (карбида вольфрама, оксида алюминия, нитрида титана и карбида титана) в планетарной мельнице в контролируемой атмосфере. Присадочную порошковую проволоку подавали в хвостовую часть сварочной ванны и дополнительно подогревали проходящим током для стабильности процесса. Применение присадочной порошковой проволоки позволяет уменьшить размеры первичной структуры металла шва. При этом проявляется влияние как дополнительного охлаждения сварочной ванны присадочной проволокой, так и влияние непосредственно ультрадисперсных частиц. В случае применения порошковой проволоки наблюдаются существенные изменения размеров структуры металла шва как при использовании композиционных гранул на базе порошка никеля, так и на базе порошка железа. В данном случае следует выделить порошковые проволоки, в состав которых введены частицы карбида вольфрама и карбида титана.

Их применение позволяет снизить ширину столбчатых кристаллов в 2 раза.

Анализ результатов испытаний на ударный изгиб при температуре минус 20 °С в сочетании с фрактографическим анализом сварных швов, выполненных с применением присадочной порошковой проволоки, показали, что использование проволоки с карбидом вольфрама практически на порядок снижают разброс значений ударной вязкости без существенного изменения среднего ее значения. Особое внимание стоит обратить на частицы карбида титана, которые приводят к повышению среднего значения ударной вязкости практически на 50 % как при использовании композиционных гранул на основе порошка никеля, так и на основе порошка железа. Карбид титана остается стабильным при условии его введения в хвостовую часть сварочной ванны, в составе которой присутствует углерод, а также выступает в роли центра кристаллизации с последующим снижением размера первичной структуры и повышения ударной вязкости.

Также в работе рассмотрен вопрос армирования наплавленного металла системы Fe–Cr–C частицами карбида титана. Карбид титана вводили в состав шихты присадочной порошковой проволоки. Показано, что при введении карбида титана в составе порошковой проволоки наблюдается частичное растворение карбида титана с последующим его выпадением в составе эвтектики размером 3...5 мкм. Мелкие карбиды титана характеризуются равномерным распределением по объему наплавленного металла, тогда как крупные карбиды концентрируются в верхней части наплавленного металла.

УДК 621.791.927.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ТИТАН–АЛЮМИНИЙ

А. И. КОВТУНОВ, В. В. ЕЛЬЦОВ, А. Г. БОЧКАРЕВ, Ю. Ю. ХОХЛОВ

Тольяттинский государственный университет
Тольятти, Россия

UDC 621.791.927.5

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ALLOYING COMPONENTS ON THE HEAT RESISTANCE OF WELDED ALLOYS OF THE TITANIUM–ALUMINUM SYSTEM

A. I. KOVTUNOV, V. V. ELTSOV, A. G. BOCHKAREV, YU. YU. KHOKHLOV

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния легирующих компонентов на химический состав наплавленных на титан сплавов системы титан–алюминий с применением алюминиевой и алюминиево-кремниевых присадочных материалов. Установлено влияние кремния, циркония и ниобия на жаростойкость сплавов системы титан–алюминий, наплавленных с применением алюминиевых и алюминиево-кремниевых присадочных проволок.

Ключевые слова: наплавка, сплавы титан–алюминий, легирующие компоненты, присадочная проволока, жаростойкость, химический состав.

Abstract. The results of studies of the effect of alloying components on the chemical composition of alloys of the titanium–aluminum system deposited on titanium with the use of aluminum and aluminum-silicon filler materials are presented. The influence of silicon, zirconium and niobium on the heat resistance of alloys of the titanium–aluminum system deposited with the use of aluminum and aluminum-silicon filler wires has been established.

Keywords: hardfacing, titanium–aluminum alloys, alloying components, filler wire, heat resistance, chemical composition.

Введение. Интерметаллидные сплавы титан–алюминий находят все более широкое применение в промышленности, что связано с их уникальным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств.

Алюминиды титана имеют более высокую жаростойкость и жаропрочность, чем промышленные титановые сплавы, их плотность в 2,5 раза ниже плотности жаропрочных никелевых сплавов. Наибольший практический интерес представляют алюминиды Ti_3Al и $TiAl$ [1]. Сплавы титана с алюминием могут успешно применяться в качестве жаростойких наплавленных слоев на изделиях из титана [2]. Жаростойкость наплавленных слоев определяется прежде всего содержанием алюминия и может быть повышена легированием. В качестве легирующих компонентов, повышающих жаростойкость алюминидов титана, рекомендуют применять кремний, цирконий, ниобий и их комбинации [1, 3–5].

Цель работы – определить влияние легирующих компонентов на жаростойкость наплавленных сплавов системы титан–алюминий.

Методика проведения исследований. Аргано-дуговую наплавку неплавящимся электродом сплавов системы титан–алюминий проводили на специальной автоматической двухкоординатной установке с использованием сварочной горелки AUT-TIG 400W фирмы Abicor-Bensel и универсального сварочного источника Migatronic BDH 550 [6].

Для наплавки использовали образцы из титана марки BT1-0 размером 150×120×10 мм и присадочную алюминиевую проволоку СвА5 диаметром 1,2 мм. Присадочную проволоку вводили в хвостовую часть жидкометаллической ванны, что обеспечивало стабильное формирование наплавленного валика и уменьшало потери алюминия на угар и разбрызгивание [2, 6]. Скорость подачи присадочной проволоки изменялась в пределах $V_{n/n} = 1...5$ м/мин при скорости наплавки $V_H = 0,15$ м/мин и силе тока $I_H = 270$ А. Варьирование скоростью подачи присадочной проволоки позволяло получать наплавленный металл с различным содержанием алюминия.

Для легирования наплавленного металла кремнием применяли присадочные проволоки СвАК5, СвАК12. Для легирования цирконием и ниобием применяли циркониевую (диаметр 1,2 мм) и ниобиевую проволоку (диаметр 1,5 мм), которые укладывали на титановые образцы в специальные пазы, изготовленные перед наплавкой. Проволока укладывалась в один, два и три ряда, что позволяло изменять степень легирования цирконием и ниобием наплавленных сплавов.

Жаростойкость покрытия определялась по относительному изменению массы образцов с одинаковой площадью поверхности, выдерживаемых в печи сопротивления при 800 °С. Температуру испытаний выбрали исходя из максимальной температуры эксплуатации алюминидов титана [1]. Массу образцов измеряли через каждые 100 ч выдержки после предварительного удаления продуктов высокотемпературной коррозии с поверхности образцов.

Исследования химического состава наплавленного металла проводились методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.

Результаты исследований. Наплавка сплавов титан–алюминий в установленном диапазоне режимов обеспечивает формирование валиков со стабильными геометрическими параметрами.

С увеличением скорости подачи присадочной проволоки увеличивалось содержание алюминия и алюминия и кремния при использовании силуминовой присадочной проволоки в наплавленном металле, в связи с увеличением массового расхода проволоки и уменьшения площади проплавления основного металла (рис. 1). Содержание алюминия в наплавленном металле в зависимости от режимов наплавки и применяемой присадочной проволоки находилось в пределах 9 %...42 %. Содержание кремния в наплавленном металле при применении проволоки СвАК5 составляло 0,6 %...3,5 %, а при применении проволоки СвАК12 – 1,2 %...6,8 %. При легировании цирконием и ниобием содержание алюминия в наплавленном металле снижалось на 1 %...5 % в зависимости от скорости подачи присадочной проволоки и объема вводимого

легирующего компонента. Содержание циркония в наплавленном металле составляло 2,5 %...7,5 % в зависимости от количества проволок в укладке. Содержание ниобия составляло 6 %...8,5 % при использовании одной проволоки, 14,5 %...17,5 % при использовании двух проволок ниобия, а при укладке в три ряда содержание ниобия доходило до 21,3 %.

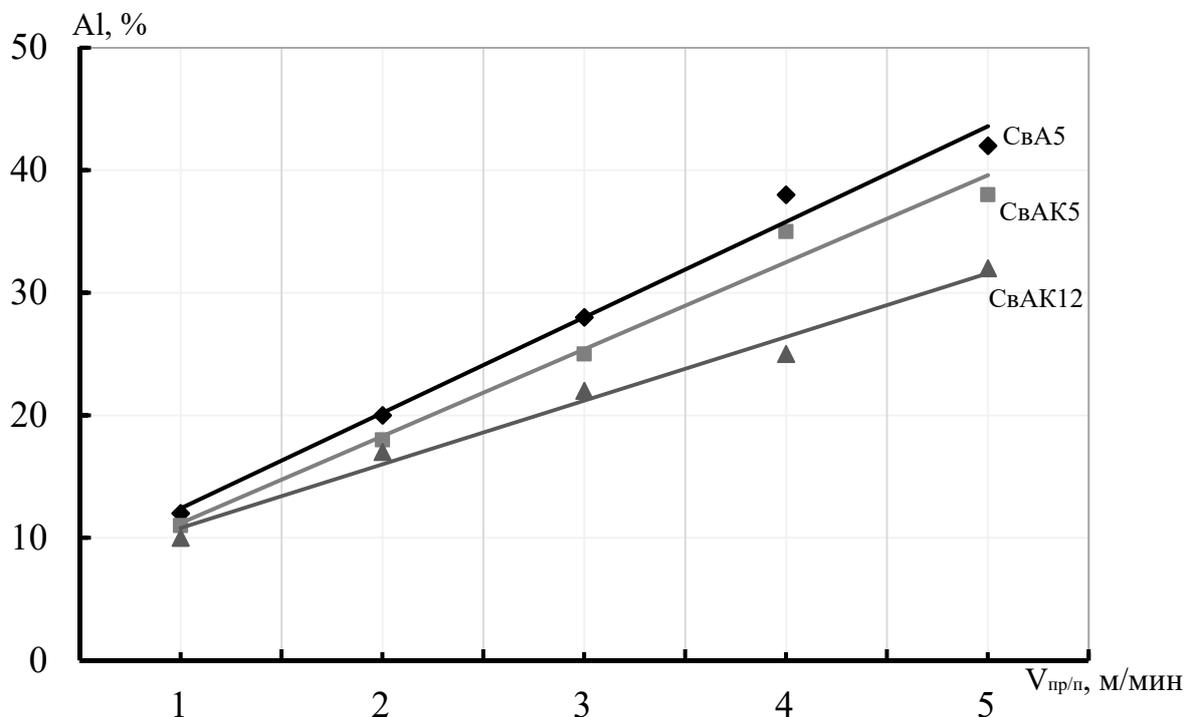


Рис. 1. Зависимость содержания алюминия от скорости подачи алюминиевой и алюминиево-кремниевой присадочной проволоки

В зависимости от содержания алюминия, исходя из диаграммы состояния титан–алюминий, структура наплавленного металла представлена фазами: α ; α_2 (Ti_3Al) + α ; α_2 (Ti_3Al); α_2 + γ ($TiAl$); γ ($TiAl$) [7]. При содержании кремния более 1,5 % в структуре наплавленного металла наблюдаются включения силицидов титана. Исходя из химического состава вероятно это фазы Ti_3Si и $Ti_5(AlSi)_3$ [8–11]. Цирконий при введении в жидкометаллическую ванну легировал алюминиды титана, благодаря значительной его растворимости в фазах: α ; α_2 , γ [12,13].

Исследования жаростойкости при выдержке в течение 700 ч при температуре 800 °С показали, что потеря массы наплавленных образцов из сплавов системы титан–алюминий в зависимости от содержания алюминия составляла 2 %...20 % (рис. 2).

Применение присадочной проволоки СВАК5 заметно повышает жаростойкость наплавленного металла. Значительное повышение жаростойкости особенно наблюдается при содержании алюминия 10 %...25 % (по массе). Потеря массы образцов при этом уменьшается в 3–4 раза. Применение присадочной проволоки СВАК12 еще больше повышает жаростойкость наплавленного металла.

Повышение жаростойкости связано с легированием поверхностных слоев наплавленного металла кремнием и снижением скорости окисления сплавов системы титан–алюминий. Кремний способствует образованию на поверхности наплавленного металла стабильного оксидного слоя на основе Al_2O_3 , что обедняет содержание алюминия на поверхности металла и обеспечивает формирование между оксидным слоем и металлом слоя на основе силицидов и оксидов титана [3–5].

Легирование цирконием повышает жаростойкость наплавленного металла, что также отмечалось в [12]. Особенно значительно повышается жаростойкость при скоростях подачи алюминиевой проволоки 1...3 м/мин и содержании алюминия от 8 % до 30 %. Потеря массы этих образцов уменьшалась в 1,5–2 раза при однорядной укладке циркония и в 2–4 раза при двухрядной (рис. 3). Совместное легирование кремнием и цирконием наплавленного металла снижает потерю массы образцов в 4–10 раз по сравнению с нелегированными наплавленными алюминидами титана (см. рис. 3). При содержании алюминия более 20 % и легировании алюминидов титана кремнием и цирконием масса образцов увеличивалась из-за более прочной связи окисленного слоя с основным металлом и невозможностью его удаления при испытаниях.

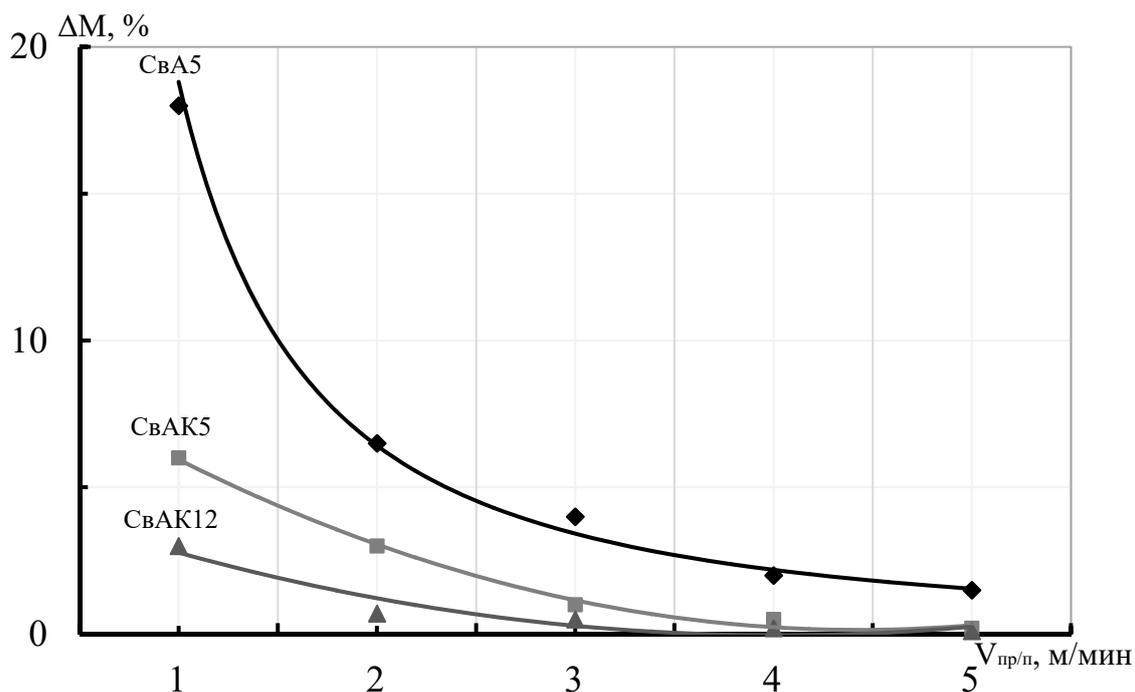


Рис. 2. Потеря массы образцов при испытаниях на жаростойкость в зависимости от скорости подачи при использовании различных присадочных проволок

При дополнительном легировании наплавленного металла ниобием наблюдалось увеличение массы образцов, но не более чем на 2 % (рис. 4). Применение присадочной проволоки СВАК12 совместно с легированием ниобием также повышает жаростойкость наплавленного металла. Потеря массы

образцов при этом составляла не более 1,5 %, а при скорости подачи присадочной проволоки 4 м/мин – не более 0,2 %.

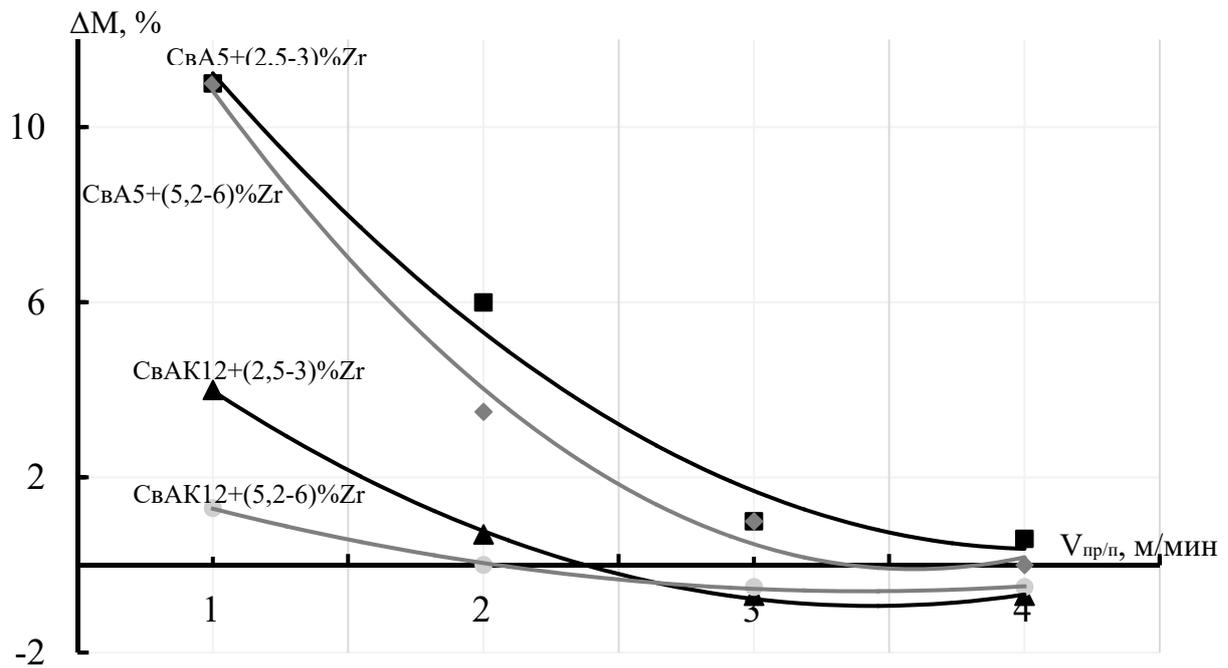


Рис. 3. Потеря массы образцов при испытаниях на жаростойкость в зависимости от скорости подачи при использовании различных присадочных проволок с дополнительным легированием цирконием

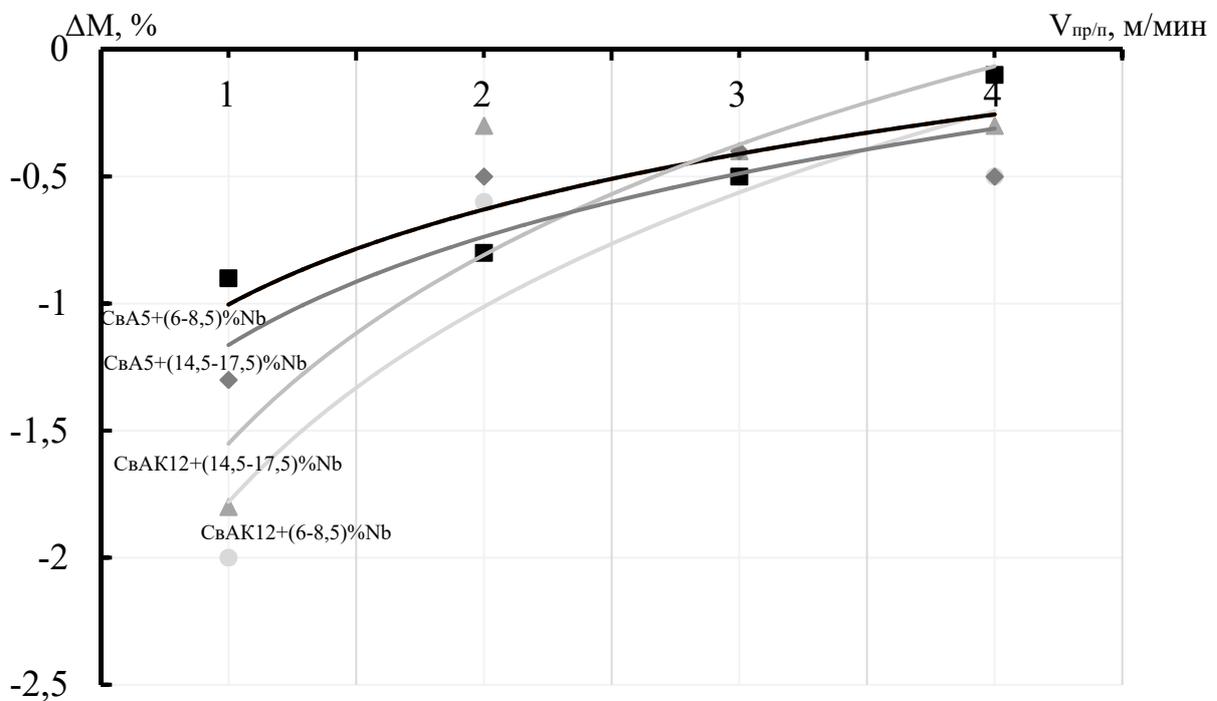


Рис. 4. Потеря массы образцов при испытаниях на жаростойкость в зависимости от скорости подачи при использовании различных присадочных проволок с дополнительным легированием цирконием

Выводы.

1. Жаростойкость наплавленного металла зависит от содержания алюминия и кремния. Увеличение содержания алюминия в пределах 10 %...42 % (по массе) и кремния в пределах 0,6 %...6,8 % (по массе) повышает жаростойкость наплавленного металла. Повышение жаростойкости связано с образованием на поверхности наплавленного металла оксидных слоев, содержащих Al_2O_3 . Кремний способствует формированию на сплавах системы титан–алюминий оксидных слоев на основе Al_2O_3 .

2. Легирование ниобием и цирконием наплавленных сплавов системы титан–алюминий повышает их жаростойкость. Особенно эффективно комбинированное легирование этими элементами с кремнием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Колачев, Б. А.** *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б. А. Колачев. – Москва: МИСИС, 2005. – 432 с.
2. **Ковтунов, А. И.** Влияние режимов наплавки на структуру и свойства покрытий системы титан–алюминий / А. И. Ковтунов, Д. И. Плахотный, А. А. Гуцин // *Сварка и диагностика*. – 2016. – № 2. – С. 35–37.
3. **Даутов, С. С.** Дегратация поверхности лопаток авиационных двигателей ГТД из интерметаллидного сплава TNM-B1 и разработка способов их защиты: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / С. С. Даутов. – Уфа, 2017. – 135 л.
4. **Yang, M.-R.** Oxidation Resistance Improvement of TiAl Intermetallics Using Surface Modification / M.-R. Yang, S. Wu-K // *Bulletin of the College of Engineering*. – 2003. – Vol. 89. – P. 3–19.
5. **Rahmel, A.** Thermodynamic Aspects of TiAl and TiSi₂ oxidation: The Al–Ti–O and Si–Ti–O phase diagrams / A. Rahmel, P. J. Spencer // *Oxidation of Metals*. – 1990. – Vol. 35. – P. 53–68.
6. **Ковтунов, А. И.** *Аргоно-дуговая наплавка сплавами на основе системы железо–алюминий* / А. И. Ковтунов. – Тольятти: ТГУ, 2014. – 140 с.
7. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т.* / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – Москва: Машиностроение, 2001. – Т. 3, кн. 1. – 1872 с.
8. **Raghavan, V.** Al–Si–Ti (Aluminum–Silicon–Titanium) / V. Raghavan // *J. Phase Equilib. Diffus.* – 2009. – Vol. 30, № 1. – P. 83–88.
9. Электронно-ионно-плазменные методы наноструктурирования поверхностного слоя сплавов на основе титана и алюминия / А. А. Клопотов [и др.] // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 10 Междунар. конф., Минск, 24–27 сент. 2013 г.* – Минск, 2013. – С. 257–259.
10. **Pierre Perrot.** Al–Si–Ti (Aluminium–Silicon–Titanium) / Pierre Perrot // *Landolt-Börnstein*. – New Series IV/11A4.
11. **Murray, J. L.** The Si–Ti (silicon–titanium) system, phase diagrams of binary titanium alloys / J. L. Murray // *ASM, Metals Park, Ohio*. – 1987. – P. 289–293.
12. Isothermal section of Al–Ti–Zr ternary system at 1273 K / F. Yang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 585. – P. 325–330.
13. Isothermal section of Al–Ti–Zr ternary system at 1073 K / Kai-li LÜ [et al.] // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2016. – Vol. 26, № 11. – P. 3052–3058.

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, НАПЫЛЕНИЯ**Ю. С. КОРОБОВ^{1,2}, Б. А. ПОТЕХИН³, М. А. ФИЛИППОВ², В. И. ШУМЯКОВ², Ю. С. ДАВЫДОВ², Н. М. РАЗИКОВ²**¹ Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина³ Уральский государственный лесотехнический университет Екатеринбург, Россия

UDC 621.791

DEVELOPMENT OF ECONOMICALLY ALLOYED FLUX-CORED WIRES FOR WELDING, SURFACING, THERMAL SPRAYING**YU. S. KOROBOV, B. A. POTEKHIN, M. A. FILIPPOV, V. I. SHUMYAKOV, YU. S. DAVYDOV, N. M. RAZIKOV**

Аннотация. Выполнен комплекс исследований по разработке и применению экономнолегированных порошковых проволок для получения покрытий различного назначения: износостойкого вида Fe–C–Cr–Al–Ti со структурой метастабильного аустенита; жаростойкого вида (Fe–Cr–Al), дополнительно легированных Ti, Si, B, Y; антифрикционного вида композитной структуры «бронза–мартенситно-стареющая сталь». Покрытия отличаются повышенной стойкостью к механическим и тепловым нагрузкам различных типов. Приведены примеры применения покрытий, полученных дуговой и лазерной сваркой/наплавкой, дуговой и газопламенной металлизацией в машиностроении, энергетике, металлургии.

Ключевые слова: порошковая проволока, метастабильный аустенит, антифрикционная бронза, жаростойкость, дуговая сварка, лазерная наплавка, дуговая металлизация, газопламенное напыление.

Abstract. A set of studies on the development and use of economically alloyed flux-cored wires for performing coatings for various purposes was carried out. The wires include the following: wear-resistant type Fe–C–Cr–Al–Ti with the structure of metastable austenite; heat-resistant type of Fe–Cr–Al, additionally alloyed with Ti, Si, B, Y; antifriction composite of «bronze–maraging steel» structure. Coatings are characterized by increased resistance to mechanical and thermal loads of various types. Examples of the application of coatings obtained by arc and laser welding/surfacing, arc and flame spraying in mechanical engineering, power engineering, and metallurgy are presented.

Keywords: flux-cored wire, metastable austenite, antifriction bronze, heat resistance, arc welding, laser surfacing, arc spraying, flame spraying.

В качестве материалов для получения износо- и жаростойких покрытий газотермическим напылением, дуговой и лазерной наплавкой перспективны экономнолегированные порошковые проволоки. Авторами выполнен комплекс

исследований по разработке и применению таких проволок для получения покрытий различного назначения: износостойкого вида Fe–C–Cr–Al–Ti со структурой метастабильного аустенита, жаростойкого вида фехралей (Fe–Cr–Al), дополнительно легированные Ti, Si, B, Y, антифрикционного вида композитной структуры «бронза–мартенситно–стареющая сталь».

Покрyтия со структурой метастабильного аустенита. Материалы с метастабильным аустенитом (МСА) в качестве основной структурной составляющей отличаются экономичностью легирования, высокой стойкостью при износе (абразивном, эрозионном, кавитационном и др.). Это обусловлено тем, что в процессе приложения значительных внешних нагрузок (свыше 2500 МПа) в таких материалах происходит деформационное преобразование микрогетерогенной структуры МСА в дисперсный мартенсит, сопровождающееся синергетическими эффектами. Во-первых, увеличение доли мартенситной фазы в структуре ведет к росту твердости. Во-вторых, энергия внешней нагрузки, которая воздействует на поверхность, рассеивается вследствие микроТРИП-эффекта деформационного превращения метастабильного аустенита в мартенсит, что вызывает релаксацию микронапряжений в поверхностных слоях. Также происходит снижение напряжений в покрытии вследствие снижения интервала температур протекания структурных мартенситных превращений [1]. При этом мартенситное превращение происходит с крайне высокой скоростью, порядка 10^{-7} с. Это быстрее примерно на порядок, чем время самых динамичных внешних механических воздействий.

Основы такого подхода в 1950-х гг. разработали наши предшественники из Института физики металлов УрО РАН и УрФУ – академик В. Д. Садовский, профессора И. Н. Богачев и М. И. Разиков с сотрудниками [2]. Было показано, что у металла с МСА-структурой, подвергающегося внешним воздействиям, наблюдается значительное повышение свойств за счет реализации внутреннего ресурса самого материала. Данный эффект положительно проявился при различных видах износа (абразивный, адгезионный, эрозионный, кавитационный) и динамических воздействий, где уровень нагрузок соответствует приведенным выше.

Указанные особенности реализованы в порошковых проволоках для получения покрытий дуговой металлизацией, дуговой наплавкой против абразивного, адгезионного [3, 4] и кавитационного при наличии гидроабразива [5–7] износа, лазерной наплавкой против адгезионного износа [8], для сварки соединений из броневых (среднеуглеродистых среднелегированных) сталей, подвергающихся баллистическим воздействиям [9]. Для особо жестких видов ударно-абразивного воздействия на основании расчетов фазового состава и структуры наплавки в состав проволок добавлены карбидо- и боридообразующие элементы [10].

Жаростойкие покрытия для условий износа и коррозии до 800 °С. Распространенным материалом для работы в условиях износа и коррозии при

температурах до 800 °С являются Fe–Cr–Al сплавы, которые обладают высокой жаростойкостью за счет формирования на их поверхности при нагреве пленки Al_2O_3 , которая характеризуется высокой температурой плавления, химической и термической стабильностью. Для предупреждения развития локальной высокотемпературной коррозии (ЛВК) сплавы легируют Ti, Si, что приводит к образованию термодинамически стабильных и жаростойких карбидов TiC и подокисного диффузионно-барьерного слоя оксида SiO_2 . При этом предотвращается формирование карбидов $(Fe,Cr)_7C_3$ и нитридов AlN, инициирующих ЛВК, а на поверхности сплавов при нагреве формируется преимущественно пленка Al_2O_3 . Легирование Y обеспечивает повышение прочности сцепления пленки Al_2O_3 с основным металлом в процессе циклических нагревов. Наличие элементов внедрения (B, N, C) приводит к образованию упрочняющих избыточных фаз – боридов, карбидов, нитридов или фаз смешанного состава. Целенаправленное формирование таких фаз, в частности за счет легирования B, перспективно для повышения износостойкости при повышенных температурах.

В металлизационных покрытиях из Fe–Cr–Al порошковых проволок проявляются эффекты, аналогичные сплошным материалам. Однако имеются отличия, поскольку окисление происходит как по поверхности, так и по ламеллярным слоям, образующимся при формировании покрытия. Также влияние оказывают особенности формирования газотермических покрытий [11].

На основе анализа закономерностей изменения жаростойкости с применением физико-химического и нейросетевого моделирования [12, 13] разработана гамма порошковых проволок базовой системы легирования Fe–Cr–Al с добавлением Ti, Si, Y, B для жаростойких применений. Их химический состав оптимизирован по критерию минимального окисления покрытия с учетом влияния технологических параметров процесса металлизации и исходного состава распыляемой проволоки. Путем варьирования соотношения легирующих элементов получены и исследованы составы, эффективно работающие до 500 °С при наличии абразивного воздействия и до 800 °С в условиях газовой коррозии [14].

Покрyтия для антифрикционных применений. Для подшипников скольжения, работающих при высоких нагрузках и скоростях относительного скольжения, распространенными антифрикционными материалами являются оловянистые бронзы вида БрО10, баббиты вида Б83 и алюминиевые бронзы, легированные Fe вида БрАЖ 9-4. У оловянистых бронз ограниченная свариваемость из-за горячих трещин, обусловленных интерметаллидами. Баббиты отличаются низкой технологичностью при сварке. Поэтому эти материалы применяют в виде литья, у которого высокий уровень брака и низкий коэффициент использования металла. У бронзы БрАЖ 9-4 выше механическая прочность и она отличается хорошей свариваемостью. Однако у нее ниже антифрикционные свойства в сравнении с аналогами.

В качестве альтернативы разработан новый класс материалов композитной структуры, включающей дендриты из мартенситно-старееющей стали на основе Fe, Ni и бронзовую матрицу, заполняющую междендритные пространства [15]. Указанные дендриты выполняют роль упрочняющей фазы, аналогично интерметаллидам в распространенных антифрикционных материалах (баббитах, оловянистых и алюминиевых бронзах). Однако в отличие от последних, они не только обеспечивают низкий коэффициент трения и высокую стойкость против износа, но и обладают высокой стойкостью против образования горячих трещин, характерного дефекта при сварке/наплавке типовых бронз.

Направления применений. Совместно с предприятиями по изготовлению сварочных материалов (ЗСМ, Екатеринбург и др.) налажен выпуск порошковых проволок указанных классов диаметром 1,2...2,0 мм, что позволяет использовать их для технологичных способов наплавки/напыления [16].

В сварных соединениях высокопрочных среднелегированных сталей резко снижена склонность к образованию холодных трещин шва при высокой стойкости к внешним динамическим нагрузкам [9].

У напыленных МСА-покрытий полученные характеристики твердости (51...53 HRC) и адгезионной прочности (43...45 МПа) достаточны для обеспечения надежности на деталях типового применения. Это шейки валов/осей под подшипники качения и скольжения, рабочие поверхности штоков гидроцилиндров, плоские направляющие, подверженные высоким динамическим нагрузкам [4, 17].

При наплавке слои с МСА-структурой метастабильного аустенита отличаются высокой надежностью при различных видах внешних воздействий. Это крановые колеса, плунжеры гидропрессов, гребные винты, рабочие органы землеройных машин и др. Их износостойкость повышена в 2–5 раз в сравнении с базовыми вариантами [18, 19]. Покрытия на лопатках паровых турбин показали одинаковую стойкость со стеллитовыми против кавитационно-эрозионного износа за 5-летний период наблюдений [7].

Cr13Al5B5Y покрытия, полученные дуговой металлизацией, имеют тот же уровень жаростойкости при 700 °С, что и аустенитные стали, и на один-два порядка выше по сравнению с котельными сталями перлитного (12Х1МФ) и мартенситно-ферритного (1Х12В2МФ) классов. Хлор-индуцированная коррозия происходит главным образом на поверхности, толщина продукта коррозии на поверхности покрытия аналогична покрытию на основе никеля (Inconel 625). Микротвердость составила $HV_{0,05}$ (1220 ± 50). Износостойкость выше в сравнении с альтернативами, например относительно стали Ст20, в 12 раз [14].

Применение покрытий композитной структуры «бронза–мартенситно-старееющая сталь» дает следующие возможности:

– замена цельнобронзовых деталей трения (плунжеры гидросистем, запорная арматура) на стальные с бронзовым покрытием, экономия бронзы 3...5 кг на деталь;

– увеличение ресурса подшипников скольжения и повышение технологичности их изготовления за счет замены применяемых антифрикционных материалов. В типовых условиях жидкостного трения ($P = 1$ МПа, $V = 3$ м/с, путь трения – 100 км) износ покрытий из композитных бронз ниже в сравнении с альтернативами (табл. 1). При этом коэффициент трения на уровне баббитовых покрытий при нагрузках – до 5 МПа.

Табл. 1. Относительный износ антифрикционных покрытий

Материал	БрЖНА 12-7-1, ДН	Баббит Б83, ГН/ПН	БрО10, литье	Бронза DT-CuAl18, ДН
Относительный износ	1	3,2/1,4	2,1	1,3
<i>Примечание – ДН – дуговая наплавка; ГН – газовая наплавка; ПН – плазменное напыление</i>				

Выводы.

1. На основе анализа высокотемпературных физико-химических взаимодействий при напылении/наплавке разработана гамма порошковых проволок для нанесения покрытий различного назначения: износостойкого вида Fe–C–Cr–Al–Ti со структурой метастабильного аустенита; жаростойкого вида Fe–Cr–Al, дополнительно легированных Ti, Si, B, Y; антифрикционного из композитной бронзы. Покрытия отличаются повышенной стойкостью к соответствующим нагрузкам в сравнении с альтернативами.

2. Освоено производство порошковых проволок указанных классов диаметром 1,2...2,0 мм, что позволяет использовать их для технологичных способов наплавки/напыления.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», номер госрегистрации 122021000033-2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппов, М. А.** Износостойкие стали для отливок: монография / М. А. Филиппов, А. А. Филиппенков, Г. Н. Плотников. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. – 358 с.
2. **Счастливцев, В. М.** Роль принципа метастабильности аустенита Богачёва – Минца при выборе износостойких материалов / В. М. Счастливцев, М. А. Филиппов // МИТОМ. – 2005. – № 1. – С. 6–9.
3. Метастабильный хромистый аустенит как структурный фактор повышения износостойкости наплавленного металла и напыленных покрытий / Ю. С. Коробов [и др.] // *Металловеды и металлурги* / Под ред. С. С. Черняка. – Иркутск: ИГУПС, 2013. – С. 40–46.
4. An Influence of Strain-Induced Nucleation of Martensitic Transformations on Tribological Properties of Sprayed and Surfaced Depositions / Yu. S. Korobov [et al.] // *Proc. from ITSC*. – 2016. – P. 694–699.
5. The effect of martensitic transformation on the cavitation erosion resistance of a TiG-deposited Fe–Cr–C–Al–Ti layer / Yu. S. Korobov [et al.] // *Surface and Coating Technology*. – 2021. – P. 1–13.
6. Сравнительная стойкость против кавитационной эрозии аустенитных сталей различного уровня метастабильности / Ю. С. Коробов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 61–72.

7. Восстановление разрушенной защиты входных кромок рабочих лопаток паровых турбин путем наплавки кавитационно-стойких слоев со структурой метастабильного аустенита / В. Л. Мазуровский [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2022. – № 4. – С. 6–10.
8. Особенности превращения метастабильного аустенита в мартенсит, деформации при лазерной наплавке порошковой проволокой 60Cr7TiAl / Н. В. Гохфельд [и др.] // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, вып. 12. – С. 1967–1973.
9. Особенности структуры сварного соединения среднеуглеродистой хромистой стали, содержащей метастабильный аустенит / Ю. С. Коробов [и др.] // Материаловедение. – 2019. – № 6. – С. 3–7.
10. **Королёв, Н. В.** Метод расчетного определения фазового состава и структуры износостойких наплавочных сплавов / Н. В. Королёв, О. В. Пименова, В. Н. Бороненков // Сварочное производство. – 2002. – № 4. – С. 11–16.
11. High-Temperature Oxidation Behavior of Fe–25Cr–5Al Arc Spraying Coatings / Yu. Korobov [et al.] // Proc. from ITSC. – 2012. – P. 729–733.
12. Разработка порошковых проволок для дуговой металлизации жаростойких покрытий на основе нейросетевого моделирования / Ю. С. Коробов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5. – С. 20–25.
13. Порошковые проволоки Fe–Cr–Al для дуговой металлизации жаростойких покрытий / Ю. С. Коробов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 61–64.
14. Arc-Sprayed Fe-Based Coatings from Cored Wires for Wear and Corrosion Protection in Power Engineering / Yu. S. Korobov [et al.] // Coatings. – 2018. – P. 1–15.
15. **Potehkin, B. A.** Development of Composite Bronzes Reinforced by Steel Dendrites / B. A. Potehkin, A. S. Khristolyubov, A. Yu. Zhilyakov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – Vol. 59, № 5. – P. 527–532.
16. Порошковые проволоки для износо- и жаростойкой наплавки и напыления / Ю. С. Коробов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2017. – № 10. – С. 62–63.
17. **Коробов, Ю. С.** Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю. С. Коробов, В. И. Шумяков, А. С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – № 3. – С. 17–21.
18. **Кулишенко, Б. А.** Electrodes for wear-resistant overlay of parts, subjected to abrasive and impact-abrasive action / B. A. Kulishenko, A. N. Balin, M. A. Filippov // Сварочное производство. – 2004. – № 11. – С. 28–32.
19. **Разиков, Н. М.** Разработка электродов для восстановления деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания / Н. М. Разиков, М. Н. Разиков, А. П. Мажирин // Сварка и диагностика: сб. докл. МНТК. – Екатеринбург, 2013. – С. 103–106.

E-mail: yukorobov@gmail.com.

УДК 621.791

ДУГОВАЯ СВАРКА С ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ГАЛОИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

А. О. КОРОТЕЕВ, Е. А. ФЕТИСОВА

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.791

ARC WELDING WITH FUNCTIONAL MODIFICATION OF PROTECTIVE GAS ATMOSPHERE WITH HALOIDE COMPOUNDS

A. O. KARATSEYEU, E. A. FIATISAVA

Аннотация. Рассмотрены новые подходы к интенсификации металлургических процессов при дуговой сварке в среде защитных газов сталей и сплавов. Предлагается технология введения в состав защитной газовой среды галоидных соединений SF₆, что позволит эффективно снизить количество диффузионного водорода в наплавленном металле при обеспечении стабильного протекания процессов сварки и наплавки.

Ключевые слова: дуговая сварка, модификация защитной атмосферы, диффузионный водород, галоидные соединения, гексафторид серы.

Abstract. The article considers new approaches to the intensification of metallurgical processes in gas-shielded arc welding of steels and alloys. A technology is proposed for introducing SF₆ halogen compounds into the composition of the protective gaseous medium, which will effectively reduce the amount of diffusive hydrogen in the deposited metal while ensuring a stable flow of welding and surfacing processes.

Keywords: arc welding, modification of protective atmosphere, diffusion hydrogen, halogen compounds, sulfur hexafluoride.

Совершенствование конструкционных материалов для изготовления изделий с требуемым комплексом механических характеристик и свойств неразрывно связано с разработкой эффективных способов их обработки и сварки. Современные материалы отличаются от традиционно используемых ранее появлением и развитием новых подходов к упрочнению в том числе методами микролегирования с возможностью создания уникальных соотношений компонентов, обеспечивающих формирование упрочняющих фаз и развитие сложных систем в кристаллической решетке. Это позволяет получить высокую прочность при сохранении требуемого уровня пластичности. Очевидно, что чем сложнее материал в своем изготовлении, тем сложнее процессы его сварки, т. к. воздействие термического цикла неизбежно будет

приводить к нарушению не только микроструктурного состояния, но и возникновению серьезных внутренних напряжений, сопоставимых с пределом текучести. В таких условиях к процессам сварки предъявляются серьезные требования по контролю мощности тепловложения в основной материал, возможностям управления процессами кристаллизации материала в сварочной ванне с получением требуемого уровня дисперсности микроструктуры.

В последнее время при изготовлении нагруженных элементов металлоконструкций все больше используются низколегированные высокопрочные стали (HSLA). Эффективность их применения обусловлена возможностью снижения металлоемкости конструкции при сохранении требуемой несущей способности. При этом в состоянии поставки сталь имеет бейнитную структуру, получаемую контролируемой скоростью охлаждения во время высокотемпературной прокатки за счет легирования в небольших количествах хромом, никелем, молибденом и др.

Технология сварки таких материалов, как правило, предполагает не только контроль тепловложения в основной металл, но и достаточно высокую культуру производства, и не допускает присутствия загрязнений на кромках свариваемых деталей, являющихся источником посторонних примесей в зоне образования соединения.

Наиболее распространенным способом сварки рассматриваемых материалов в промышленности на сегодняшний день является дуговая сварка в среде защитных газов. На ее долю приходится около 80 % использования благодаря простоте автоматизации и возможностям создания роботизированных линий с полностью автономным управлением, высокой, по сравнению с другими технологиями, производительности, а также возможностям сварки материалов различных структурных классов и групп. Подавляющее большинство новых исследований и разработок в области дуговой сварки в защитных газах в последнее время связано с совершенствованием способов управления оборудованием, созданием цифровых программируемых систем, позволяющих повысить технологические характеристики процесса. Во многом это связано с тем, что с металлургической точки зрения технология обладает наименьшими возможностями для совершенствования. Если не рассматривать применение порошковых присадочных материалов, сварка осуществляется голой проволокой с ограниченным взаимодействием с газовой фазой. Причем инертность газовой атмосферы является приоритетом в выборе защитной среды, т. к. наличие окислительного потенциала приводит к нежелательному взаимодействию с легирующими элементами присадочного металла на стадии его переноса в сварочную ванну через дуговой промежуток.

В качестве защитной газовой среды для сварки рассматриваемых сталей используются смеси на основе аргона ($\text{Ar} + \text{CO}_2$). Применение активных газов

(CO₂) ограничено небольшими добавками, что, как правило, обусловлено необходимостью обеспечения стабильного процесса плавления проволоки и переноса электродного металла через дуговой промежуток. Функция защитной газовой среды при этом практически полностью сводится к изоляции процесса от взаимодействия с атмосферным воздухом. Таким образом, в технологии отсутствует контролируемый процесс металлургической обработки расплавленного металла, являющийся одним из ключевых механизмов в способах ручной дуговой сварки покрытыми электродами и сварки под слоем флюса, т. к. отсутствует среда, осуществляющая эту обработку (шлак, флюс, электродное покрытие). Это делает процесс эффективным с точки зрения отсутствия нежелательных потерь легирующих элементов и пребывания расплавленного металла в инертной среде, с другой стороны, существенно возрастает чувствительность технологии к естественным возмущениям и присутствию посторонних продуктов в составе защитной атмосферы.

Перспективным и малоисследованным является реализация механизма активации и интенсификации металлургических процессов, происходящих в расплавленном присадочном металле и сварочной ванне, посредством контролируемого взаимодействия с компонентами защитной газовой атмосферы. При этом следует рассматривать защитную газовую атмосферу не только как способ изоляции процесса от взаимодействия с атмосферным воздухом, но, в большей степени, как среду, позволяющую управлять им. Таким образом, защитная атмосфера становится средой для осуществления металлургического взаимодействия с металлом.

Для сварных соединений рассматриваемых материалов, как и большинства классических высокопрочных сталей, опасность представляет диффузионный водород, провоцирующий появление и развитие так называемых «холодных» трещин по механизму замедленного разрушения. Вероятность присутствия водорода в защитной газовой среде при сварке достаточно высока, т. к. зачастую на предприятиях при переходе на использование в качестве защитной среды смесей на основе аргона сохраняется та же техника сварки, культура производства, качество подготовки деталей и очистки их от загрязнений, как и для сварки в среде углекислого газа, используемого ранее. При этом, в отличие от процессов сварки в углекислом газе, где эффективное связывание водорода в нерастворимые в основном металле соединения ОН осуществлялось по средствам взаимодействия с продуктами диссоциации CO₂, в защитных средах Ar + CO₂ такие механизмы практически отсутствуют.

В сварочной практике наиболее распространенным способом снижения чувствительности к водороду является применение фторсодержащих компонентов. Такой способ активно используется при сварке покрытым плавящимся электродом. В покрытии основного типа присутствуют соединения CaF₂, разлагающиеся при

плавлении электрода и обеспечивающие шлаковую защиту металла от взаимодействия с атмосферным воздухом. F при этом способен вступать в реакции с водородом, образуя нерастворимые в металле соединения HF. Аналогичным образом такой подход реализован в порошковых проволоках соответствующих типов. При сварке под флюсом фторсодержащие компоненты активно участвуют в металлургических процессах, выполняя схожие функции через флюс. Предполагается, что выделяющийся в сварочном пространстве SiF_4 связывает водород или водяной пар в плохо растворимый в стали HF.

Так как при сварке в защитных газах способы введения фторсодержащих компонентов в зону горения дуги и плавления металла ограничены, перспективным на наш взгляд является использование газообразных галогенидов в качестве добавок к защитным смесям. Это позволит использовать традиционные сварочные материалы, существенно снизив чувствительность технологии к присутствию нежелательного диффузионного водорода в наплавленном металле.

В качестве фторсодержащего газа рекомендуется использовать гексафторид серы SF_6 , широко применяемый в качестве электроизолирующего газа в предохранительных устройствах. Ранее такой способ предлагался в ряде исследований для сварки алюминиевых сплавов. Вместе с тем отсутствует целостная картина эффективности применения таких компонентов для сварки высокопрочных сталей. Так как фтор обладает высоким потенциалом ионизации, что затрудняет процессы зажигания дуги и снижает стабильность ее горения, а также способен приводить к образованию токсичных продуктов химических реакций в защитной атмосфере, его количество в защитной среде ограничивается несколькими процентами (как правило, не более 5 %).

Нами проведены экспериментальные исследования по определению эффективности введения SF_6 в состав защитной газовой атмосферы с точки зрения минимизации количества диффузионного водорода в наплавленном металле, а также стабильности протекания процессов сварки и наплавки.

Разработана экспериментальная установка и проведены исследования по определению характера горения дуги при сварке и наплавке с различным количеством SF_6 в составе трехкомпонентной смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{SF}_6$. Основной целью экспериментальных исследований было определение наиболее эффективных с точки зрения минимизации коэффициента потерь электродного металла на разбрызгивание соотношений значений параметров режима.

Результаты определения коэффициента потерь при наплавке валиков на пластину в зависимости от значения напряжения на дуге при различных скоростях подачи присадочной проволоки по традиционной технологии и при введении 0,5 % SF_6 в состав газовой смеси представлены на рис. 1.

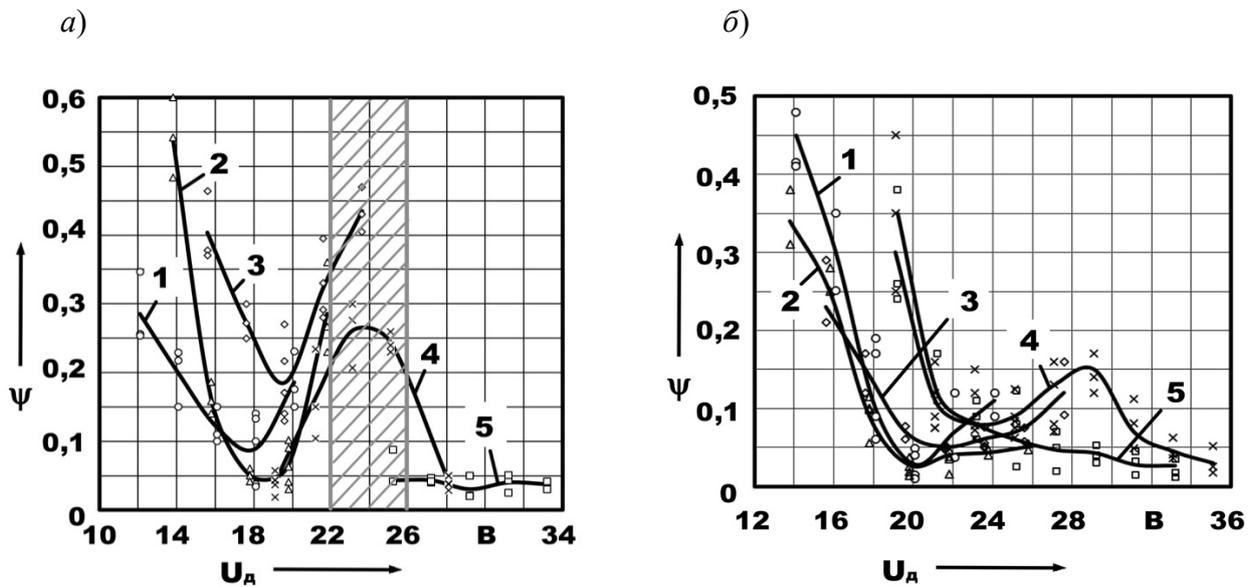


Рис. 1. Графические зависимости коэффициента потерь электродного металла ψ от напряжения на дуге U_d при различном значении силы тока $I_{св}$: *a* – традиционная технология сварки и наплавки в среде $Ar + CO_2$; *б* – сварка и наплавка в среде $Ar + CO_2 + SF_6$; 1 – график зависимости ψ от напряжения на дуге при скорости подачи проволоки 2,3 м/мин; 2 – график зависимости ψ от напряжения на дуге при скорости подачи проволоки 3,7 м/мин; 3 – график зависимости ψ от напряжения на дуге при скорости подачи проволоки 5,3 м/мин; 4 – график зависимости ψ от напряжения на дуге при скорости подачи проволоки 7,7 м/мин; 5 – график зависимости ψ от напряжения на дуге при скорости подачи проволоки 9,2 м/мин

В целом можно отметить, что при введении SF_6 в состав защитной газовой атмосферы наблюдается смещение области наиболее эффективного соотношения между значениями параметров режима в сторону большего напряжения на дуге (см. рис. 1, *б*). По-видимому, это обусловлено спецификой протекания процессов диссоциации SF_6 в области высоких температур дугового промежутка.

Анализ полученных результатов показал, что в области существования переноса электродного металла с короткими замыканиями дугового промежутка и капельного переноса (значения скоростей подачи проволоки 2,3...5,7 м/мин), в диапазоне значений регулирования напряжения на дуге существует несколько характерных участков, отчетливо регистрируемых на графиках. Первый участок характеризуется большими потерями на малых (для данной скорости подачи присадочной проволоки) значениях напряжения на дуге. Фактически в этом случае процесс нестабилен. Наблюдается повышенное разбрызгивание с выплеском сварочной ванны и части присадочной проволоки из-за ее длительного короткого замыкания. Такое соотношение значений параметров режима является нежелательным и в дальнейшем не использовалось нами при проведении исследований. Дальнейшее повышение напряжения приводит к резкому снижению значения коэффициента потерь и стабилизации процесса. При этом можно отметить, что момент стабилизации характеризуется минимальным в данных условиях

значением коэффициента потерь, что свидетельствует о благоприятных условиях для существования дугового промежутка.

Дальнейшее увеличение значения напряжения на дуге приводит к плавному росту коэффициента потерь, что наблюдается на графике в виде участка шириной в 4...6 В. Повышение напряжения в таких условиях приводит к росту длины дуги и некоторому незначительному снижению её устойчивости. Из-за пространственного сжатия дуги продуктами диссоциации SF_6 увеличение ее длины неизбежно ведет к росту размера капель электродного металла и снижению частоты коротких замыканий. В процессе проведения экспериментов это отчетливо регистрируется не только осциллографированием процесса, но и наличием характерного звукового эффекта, отражающего прерывистость процесса. В связи с этим наблюдается рост коэффициента потерь, главным образом обусловленный спецификой отделения крупных капель электродного металла от торца плавящейся проволоки и особенностями их контакта с поверхностью жидкой сварочной ванны.

Дальнейшее повышение напряжения приводит к более существенному росту потерь электродного металла, т. к. увеличение длины дуги будет усиливать эффекты взаимодействия продуктов диссоциации SF_6 в газовой защитной смеси с дуговым разрядом.

Для большинства рассматриваемых режимов наиболее эффективным является момент стабилизации процесса при относительно низких значениях напряжения в рассматриваемом диапазоне регулирования. Совершенно другая ситуация наблюдается при так называемом переходном режиме и на режимах, соответствующих струйному характеру переноса электродного металла.

Традиционно сварка и наплавка с использованием силы тока, близкой к критическому значению силы тока струйного переноса, не рекомендуется к использованию. Это обусловлено тем, что естественным является некоторое изменение силы тока в процессе выполнения сварки, обусловленное колебанием вылета электродной проволоки, возмущениями из-за наличия загрязнений на кромках деталей и другими факторами. В результате этого процесс принимает форму струйного переноса на короткое время, затем опять возвращается в режим капельного процесса. Такие изменения приводят к нестабильности физико-металлургических характеристик плавления проволоки.

В рассматриваемом случае такому режиму соответствует скорость подачи проволоки 7,7 и 9,2 м/мин. На графике наблюдается ярко выраженный максимум в области значений напряжения 28...30 В, после чего – резкое падение значения коэффициента потерь из-за перехода к струйному характеру переноса электродного металла (напряжения более 30 В). При этом использование относительно малых значений напряжения на дуге менее 22 В приводит к срыву стабильности процесса и не рекомендуется к использованию. Таким образом, существует две «площадки» стабильности процесса: в области капельного переноса металла с использованием

напряжений на дуге 22...26 В и в области струйного переноса электродного металла с использованием значений напряжения на дуге более 30 В. При этом струйный характер с точки зрения минимизации потерь на разбрызгивание традиционно является наиболее предпочтительным во всем диапазоне регулирования значений параметров режима.

Для анализа эффективности введения SF₆ в защитную атмосферу с точки зрения минимизации количества диффузионного водорода в наплавленном металле проведены экспериментальные исследования по методике глицериновой пробы. Установлено, что наличие даже 0,5 % SF₆ в составе трехкомпонентной среды Ar + CO₂ + SF₆ приводит к практически полному отсутствию характерного выделения водорода в среде глицерина. Эксперименты проведены для низкоуглеродистых сталей, характеризующихся высокой диффузионной подвижностью водорода. Таким образом, установлено, что введение SF₆ позволяет при обеспечении стабильного характера горения дуги существенно качественно снизить количество диффузионного водорода в наплавленном металле, что благоприятно сказывается на сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин.

Направление является перспективным, т. к. позволяет не только изменить условия существования дугового промежутка, интенсифицировав металлургические реакции связывания водорода в нерастворимые и ограниченно-растворимые соединения, но и изменить характер тепловложения в основной материал. В настоящее время активно проводятся исследования поведения компонентов в защитной атмосфере, роли серы как модификатора микроструктуры и возможностям управления кинетикой кристаллизации сварочной ванны. Кроме того, предлагаемая технология может быть эффективно использована для процессов аддитивного синтеза методом WAAM для стальных и алюминиевых сплавов.

E-mail: karatseyeu_artur@fastmail.com.

УДК 621.791

ЦЕНТР СЕРТИФИКАЦИИ И ИСПЫТАНИЙ***В. П. КУЛИКОВ***

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791

CERTIFICATION AND TESTING CENTER***V. P. KULIKOV***

Аннотация. Рассмотрены стандарты, устанавливающие требования к работам в области сварочного производства, касающиеся персонала, оборудования и технологических процессов. Установлены факторы, формирующие качество изделий, выполненных с применением сварочных технологий. Описана деятельность Центра сертификации и испытаний, как одной из крупнейшей организации в Республике Беларусь, выполняющей работы и контроль в области сварочного производства.

Ключевые слова: сертификация и аттестация персонала в области сварочного производства, сварочного оборудования и технологических процессов сварки, Центр сертификации и испытаний.

Abstract. The article discusses the standards that establish requirements for work in the field of welding production regarding personnel, equipment and technological processes. The factors that form the quality of products made using welding technologies are established. The activities of the Certification and Testing Center are described as one of the largest organizations in the Republic of Belarus that performs work and control in the field of welding production.

Keywords: certification and attestation of personnel in the field of welding production, welding equipment and welding processes, Certification and Testing Center.

Известные стандарты серии ISO 9000 устанавливают требования к процессам управления качеством в различных сферах производства. В этих стандартах сварка отнесена к специальным процессам. *Специальным* называется процесс, результаты которого (степень соответствия сварных соединений установленным требованиям) нельзя в полной мере проверить контролем и испытанием готовой продукции. Поэтому обеспечение качества сварки должно производиться на всех этапах производства сварной конструкции. Эта деятельность регламентируется стандартом ISO 3834 *Требования к качеству сварки металлов*. Стандарт содержит пять частей, разъясняющих различные аспекты обеспечения качества. Ключевой идеей стандарта является утверждение: «Качество сварки не может быть проверено в изделии, оно должно быть создано в нем. Даже самое обширное

неразрушающее испытание не улучшает качество изделия».

Все факторы, которые в процессе производства формируют качество изделия, можно разделить на пять групп:

- 1) качество работы персонала сварочного производства;
- 2) качество технологического процесса сварки;
- 3) качество сварочного оборудования;
- 4) качество сварочных материалов;
- 5) качество операций контроля и испытаний.

В каждой стране в той или иной степени существует система, позволяющая поддерживать перечисленные факторы на высоком уровне. Создаются органы по сертификации, аккредитованные испытательные лаборатории, центры обучения и аттестации и другие структуры.

В Республике Беларусь наиболее крупной организацией, имеющей полномочия в обеспечении качества сварки, является Центр сертификации и испытаний, созданный в Белорусско-Российском университете на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства». Он сотрудничает практически со всеми нормативными и надзорными государственными структурами и имеет от них разрешения, лицензии и аккредитации на свою деятельность.

В состав Центра сертификации и испытаний входят.

Орган сертификации сварочного оборудования, материалов, принадлежностей, аккредитованный Госстандартом Республики Беларусь (аттестат аккредитации № ВУ/112 056.01), на проведение работ по обязательному подтверждению соответствия продукции требованиям Технических регламентов Таможенного союза: ТР ТС 004/2011 *О безопасности низковольтного оборудования*, ТР ТС 010/2011 *О безопасности машин и оборудования*, ТР ТС 011/2011 *Безопасность лифтов*, ТР ТС 019/2011 *О безопасности средств индивидуальной защиты*, ТР ТС 020/2011 *Электромагнитная совместимость технических средств*, ТР ТС 032/2013 *О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением*, а также на проведение работ по добровольной сертификации сварочных материалов в Национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь.

Орган по сертификации сварочного оборудования и материалов Центра сертификации и испытаний включен в Единый реестр органов по оценке соответствия Евразийского экономического союза. Сертификаты соответствия, выдаваемые органом по сертификации признаются всеми странами-участниками Евразийского экономического союза (Российская Федерация, Республика Казахстан, Республика Беларусь, Республика Армения, Республика Киргизия).

Орган по сертификации персонала в области сварочного производства,

который имеет соответствующий аттестат аккредитации Госстандарта Республики Беларусь (№ ВУ/112 056.02) на сертификацию сварщиков и ИТР сварочного производства. Орган выдает персоналу сертификаты государственного образца на защищенном бланке. В ISO 14731–2006 для инженеров установлены следующие уровни компетенции:

– международный инженер-сварщик – квалификация IWE; требования к уровню компетенции изложены в документе Международного института сварки IAB-002-2000/EWF-409;

– международный технолог-сварщик – квалификация IWT; документ IAB-004-2000/EWF-411.

В Беларуси этим компетенциям соответствует второй, третий и четвертый уровень специалиста по сварке.

Претенденты на получение соответствующей компетенции должны иметь определенное образование, стаж работы в сварочной отрасли, пройти обучение в Институте повышения квалификации Белорусско-Российского университета и сдать два экзамена – общесварочный и специальный. Процедура работ регламентируется стандартом СТБ 1063.

Сертификация персонала в Республике Беларусь признается надзорными организациями Госпромнадзор, Госстрой, Транспортная инспекция и др.

Испытательный центр (аттестат аккредитации № ВУ/112 1.1611) аккредитован на проведение работ по испытаниям продукции на соответствие требованиям Технических регламентов Таможенного союза: ТР ТС 004/2011 *О безопасности низковольтного оборудования*, ТР ТС 010/2011 *О безопасности машин и оборудования*, ТР ТС 019/2011 *О безопасности средств индивидуальной защиты*, ТР ТС 032/2013 *О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением*, а также на проведение испытаний в Национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь (все виды механических испытаний сварных соединений, испытания сварочного оборудования, электрофизические измерения и т. д.).

Испытательный центр включен в Единый реестр органов по оценке соответствия Евразийского экономического союза. Протоколы испытаний, выдаваемые Центром сертификации и испытаний признаются всеми странами-участниками Евразийского экономического союза, перечисленными ранее.

Орган по аттестации персонала Госпромнадзора. Несмотря на то, что Госпромнадзор признает сертификаты, выданные персоналу, он имеет свою систему аттестации, в которой области технической деятельности специалиста совпадают с правилами Госпромнадзора. Экзамены проводятся в соответствии с правилами Госпромнадзора на разные технические объекты. Сварщики аттестовываются по СТБ EN 287. Некоторые предприятия имеют свои комиссии

по аттестации сварщиков.

Орган по аттестации технологических процессов сварки. Общие требования к аттестации процессов сварки в Беларуси регламентируются стандартами СТБ ISO 15607–2009 *Технические требования и квалификация технологии сварки. Общие требования*. Второй стандарт СТБ ISO 15609–2009 *Технические требования и квалификация технологии сварки. Требования к процессу*.

Производственную аттестацию технологии сварки осуществляют с целью подтверждения того, что предприятие обладает техническими и организационными возможностями, квалифицированными кадрами для выполнения сварки в соответствии с требованиями к сварным швам, изложенным в нормативных документах на сооружаемую конструкцию.

Производственную аттестацию проводят в два этапа. Первый этап выполняется на предприятии, второй – в организации, уполномоченной выполнять аттестацию технологии сварки.

По результатам проведенных на первом этапе работ организация оформляет документ (предварительную инструкцию), WPS (Welding procedure specification) и передает ее в уполномоченную организацию.

На втором этапе Центр сертификации и испытаний анализирует представленную инструкцию и при согласии с ней назначает испытание технологического процесса. Порядок проведения испытания регламентируется стандартом.

Организация в лице аттестованного сварщика выполняет сварку контрольных образцов в присутствии представителя уполномоченной организации и передает ей сваренные образцы для испытаний. Уполномоченная организация проводит механические испытания сварных соединений, их неразрушающий контроль, при необходимости специальные испытания (например, на межкристаллитную коррозию) и делает выводы о их соответствии требованиям ТНПА.

При положительном решении уполномоченная организация выдает предприятию отчет об аттестации техпроцесса WPQR (Welding procedure qualification record) с приложением всех протоколов испытаний. После этого оформляется окончательный вариант инструкции на технологический процесс сварки WPS, который является обязательным для предприятия. В рамках области распространения инструкции WPS, при наличии в штате специалиста III или IV уровня, предприятие разрабатывает свои технологические инструкции на техпроцесс сварки. Сведения об аттестованных технологических процессах передаются в надзорную организацию.

По решению уполномоченной организации вместо стандарта ISO 15614 для аттестации процедур сварки могут использоваться другие стандарты,

в соответствие с которыми процедура аттестации технологического процесса сварки несколько отличается: ISO 15610 *Аттестация на основе испытания сварочных материалов*, ISO 15611 *Аттестация на основе предыдущего опыта сварки*, ISO 15613 *Аттестация на основе испытаний перед началом производства*.

Орган по обеспечению качества в атомной энергетике. Центр сертификации и испытаний имеет лицензию Госатомнадзора на право осуществления деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения в части выполнения для эксплуатирующих организаций работ и оказания эксплуатирующим организациям услуг, влияющих на ядерную и радиационную безопасность объектов использования атомной энергии. Имея статус специализированной организации в области неразрушающего контроля и сварочного производства при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии Центр сертификации и испытаний имеет право выполнять следующие работы:

- проведение научно-исследовательских, проектных, опытно-конструкторских работ в области неразрушающего контроля, сварки, родственных процессов и технологий;

- проведение анализа проектной, конструкторской и технологической документации по запросу органов государственного управления, эксплуатирующей организации по вопросам прочности, надежности и долговечности сварных соединений, применения новых основных и сварочных материалов, причин разрушения сварных соединений и конструкций объектов;

- участие в производственной аттестации технологии сварки (разработка, исследовательская и производственная аттестация технологических процессов сварки, термообработки и контроля с выдачей заключения о возможности использования на предприятии);

- аттестация персонала в области сварочного производства: сварщиков и специалистов сварочного производства.

Центр сертификации и испытаний укомплектован высококвалифицированными специалистами, в том числе кандидатами и докторами технических наук, сертифицированными экспертами-аудиторами, сертифицированными и аттестованными специалистами сварочного производства II–IV уровней, сертифицированными специалистами по визуальному и капиллярному контролю, а также специалистами, имеющими практический опыт работы на производстве.

Центр сертификации и испытаний имеет хорошую материально-техническую базу, актуальный фонд технических нормативно-правовых актов, сайт, юридическую базу, оснащен необходимой оргтехникой и другими необходимыми ресурсами. Центр сертификации и испытаний работает как самостоятельная хозрасчетная организация.

УДК 621.762

ПОЛУЧЕНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ЛИГАТУР С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛЕГИРУЮЩЕГО КОМПОНЕНТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ХРОМОВЫХ БРОНЗ

И. А. ЛОЗИКОВ, Ф. Г. ЛОВШЕНКО

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.762

OBTAINING MODIFYING LIGATURES WITH A HIGH CONTENT OF THE ALLOYING COMPONENT FOR THE PRODUCTION OF CHROME BRONZES

I. A. LOZIKOV, F. G. LOVSHENKO

Аннотация. Приведены закономерности формирования гранулометрического состава модифицирующих лигатур с высоким содержанием легирующего компонента для производства хромовых бронз, их структуры и фазового состава в зависимости от условий механического сплавления.

Ключевые слова: получение, состав, структура, свойства, субмикроструктурные модифицирующие лигатуры, хромовые бронзы.

Abstract. The regularities of the formation of the granulometric composition of modifying ligatures with a high content of alloying component for the production of chrome bronzes, their structure and phase composition depending on the conditions of mechanical fusion are given.

Keywords: production, composition, properties, submicrocrystalline modifying ligatures, chrome bronzes.

Введение. На сегодняшний день в Республике Беларусь остро стоит задача получения специальных жаропрочных низколегированных медных сплавов электротехнического назначения, предназначенных для изготовления рабочего инструмента для всех видов машин контактной точечной, рельефной и шовной сварки. При достаточно большом выборе бронз этого типа наиболее применяемыми являются хромовые и хромоциркониевые бронзы: БрХ и БрХЦр. В качестве базовой технологии их производства служит двухстадийный способ плавки, состоящий из подготовки лигатуры и затем выплавке конечного материала. Проблемным местом, усложняющим процесс и определяющим высокую стоимость сплавов, а также экологическую безопасность производства, является изготовление лигатуры. Кроме того, классические бронзы обладают ограниченным комплексом физико-механических свойств, повысить который существующими методами термической и термомеханической обработки не представляется возможным.

Одним из перспективных методов решения проблемы является применение разработанного в Белорусско-Российском университете метода реакционного

механического сплавления, исключаяющего из технологического процесса производства лигатур высокотемпературную плавку, и, вследствие высокого модифицирующего эффекта, повышающего, в первую очередь, жаропрочность получаемых бронз.

Но применяемая в настоящее время технология позволяет уверенно получать модифицирующие лигатуры с содержанием базового легирующего компонента – хрома – только до 10 %. Для повышения эффективности процесса и снижения себестоимости производства изделий электротехнического назначения требуется довести концентрацию хрома в промышленной лигатуре минимум до 20 %.

Целью работы является исследование влияния условий обработки шихты в механореакторе на морфологию, структуру и фазовый состав механически сплавленных модифицирующих лигатур с 20-процентным содержанием основного легирующего компонента.

Для синтеза материалов применялись порошки меди ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) и хрома ПХ-1С (ТУ 14-1-1474–75).

Реакционное механическое сплавление проводилось в механореакторе – вибротельнице с четырьмя водоохлаждаемыми рабочими камерами объемом 2 дм³ каждая. Процесс осуществлялся во внутреннем пространстве герметичных камер из низкоуглеродистой стали. Размалывающими телами служили стальные шары твердостью 62...64 HRC и диаметром 9...10 мм. Продуктом механического сплавления является гранулированная композиция.

Ситовой анализ осуществлялся стандартным набором сит от 0,045 до 1,000 мм. Микротвердость исследовалась на микротвердомере Micromer-2 при нагрузках на пирамиду 0,49 и 0,98 Н. Металлографический анализ и исследование элементного состава проводился на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA IISBH с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 350/XT.

Результаты исследований и их обсуждение. Ранее проведенные исследования показывают, что в процессе обработки порошковой смеси в вибрационно-инерционном механореакторе одновременно протекают два противоположных процесса: разрушение частиц за счет накопления дефектов кристаллического строения, возникающих при пластической деформации и соединение образующихся осколков вследствие действия ван-дер-ваальсовых и электростатических сил, получающих развитие при контакте свежих неокисленных поверхностей. Механическое ударное воздействие рабочих тел на агломерированные частицы композиции приводит к сварке, сопровождающейся взаимной диффузией и химическим взаимодействием между компонентами. При многократно повторяющихся процессах разрушения и сварки формируется новый вид материала – гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой.

При этом необходимо учитывать, что механохимические реакции при механическом сплавлении протекают только в поверхностном слое гранул,

глубина которого не превышает 0,2 мм. В гранулах диаметром более 0,4 мм во внутренней зоне механически активируемые реакции развития не получают, и с увеличением размера частиц полнота превращений в обрабатываемой композиции в целом уменьшается. Но при хранении гранулированной композиции поверхность гранул окисляется за счет адсорбированного из атмосферы кислорода. Введение такой лигатуры в расплав для формирования сплава приводит к восстановлению оксида меди, который, взаимодействуя с легирующими элементами, окисляет их. Это, в первую очередь, относится к Cr и Zr – основным легирующим компонентам при плавке хромовых и хромоциркониевых бронз. Для избегания высоких потерь вводимых элементов на угар и переход в шлак размер гранул механически сплавленной лигатуры должен быть как можно большим. Следовательно, диаметр получаемых гранул должен быть в интервале 0,4...0,5 мм для того, чтобы, с одной стороны, в достаточной степени смогли протечь механохимические процессы для образования модифицирующих фаз, а с другой – частицы имели минимальную поверхность для окисления. Решение указанных задач и являлось целью проводимых исследований.

На первом этапе проводилось исследование влияние ускорения рабочих тел, степени заполнения помольной камеры рабочими телами, соотношения между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой, времени обработки шихты, температуры помольной камеры на процесс гранулирования композиций при максимальном содержании легирующего компонента. Критерием оценки достигаемых результатов являлся вид получаемых гранул и их свойства. Установлено, что наиболее действенными факторами, оказывающими влияние на формирование механически сплавленных гранул, является химический состав композиции, ее температура, а также отношение рабочих тел к объему шихты.

Полученные результаты исследований представлены на рис. 1.

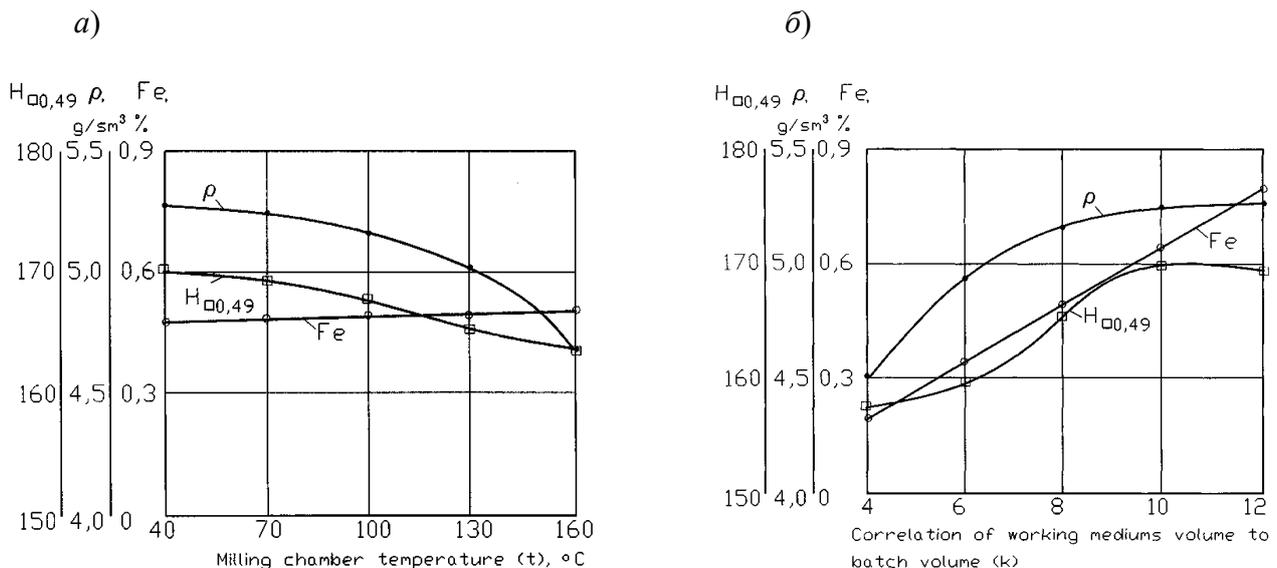


Рис. 1. Зависимость свойств гранулированной композиции $\text{Cu} - 20\% \text{Cr}$ от температуры в помольной камере (а) и отношения объема рабочих тел к объему шихты (б)

С повышением содержания Cr склонность порошковых материалов к грануляции резко снижается. Это обусловлено меньшей пластичностью хрома по отношению к медной основе и его высокой наклепываемостью. В то же время рост температуры в помольной камере данный процесс улучшает. Снижение объема загрузки в рабочую камеру способствует более жесткому контакту размалывающих тел, что также приводит к росту температуры смеси и способствует процессу сварки частиц, но подъем температуры более 80 °С приводит к налипанию порошковой смеси на шары и стенки камеры, что резко нарушает процесс механического сплавления.

Установлено, что оптимальное отношение объема рабочих тел к объему шихты должно быть не менее 12, а температура в помольной камере не превышать 80 °С.

Форма и топография гранул, полученная по оптимальному режиму и исследованная на фракции 450...630 мкм, приведена на рис. 2.

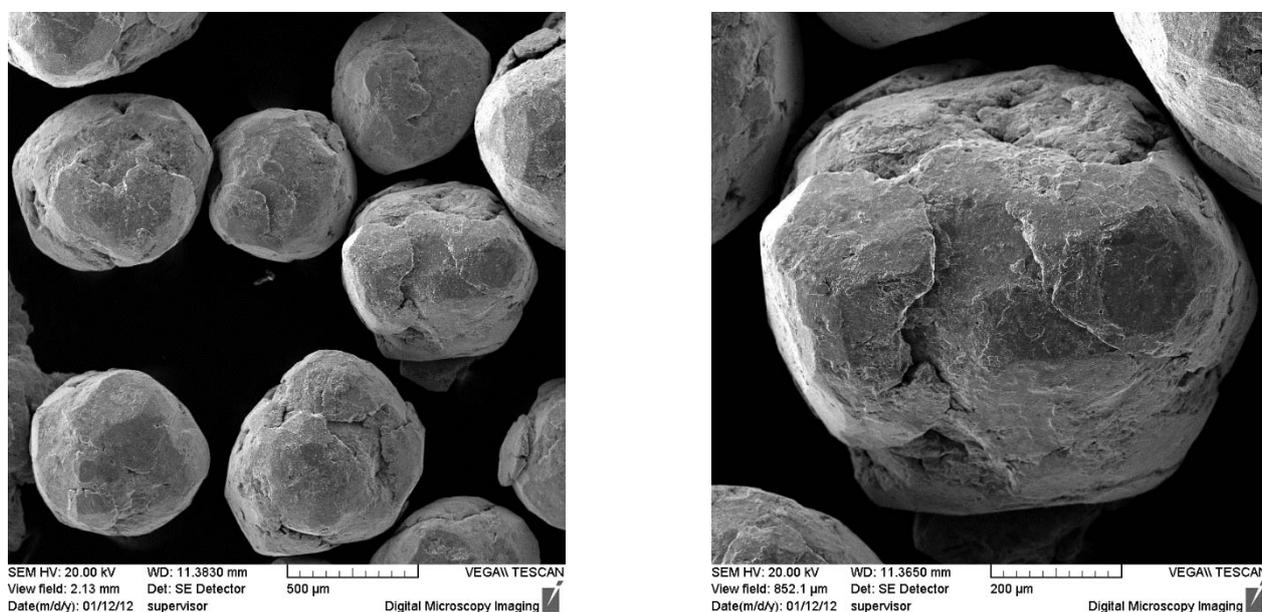


Рис. 2. Форма и топография поверхности гранул композиции Cu – 20 % Cr

Гранулы имеют округлую форму, являются плотными телами практически без пор. В то же время их слоистое строение показывает, что они являются сложными образованиями и представляют собой композиционные частицы, сваренные из нескольких более мелких гранул.

Изучение структуры гранул подтвердило их слоистое строение. С ростом содержания хрома и, соответственно, увеличения размера гранул происходит снижение степени проработки основы при механическом сплавлении, в строении выявляются микропоры и самостоятельные включения частичек хрома.

Исследование микроструктуры сканирующей электронной микроскопией на шлифах гранул, подвергнутых травлению раствором хлорида железа показало, что размер зерен основы не превышает 5...6 мкм. В свою очередь, зерна разделены на блоки размером десятые доли микрометра. В структуре гранул травлением выявляются вытянутые включения частиц легирующего

элемента хрома – светлые включения неравноосной формы размером в большем направлении до 20 мкм шириной 2...5 мкм (рис. 3).

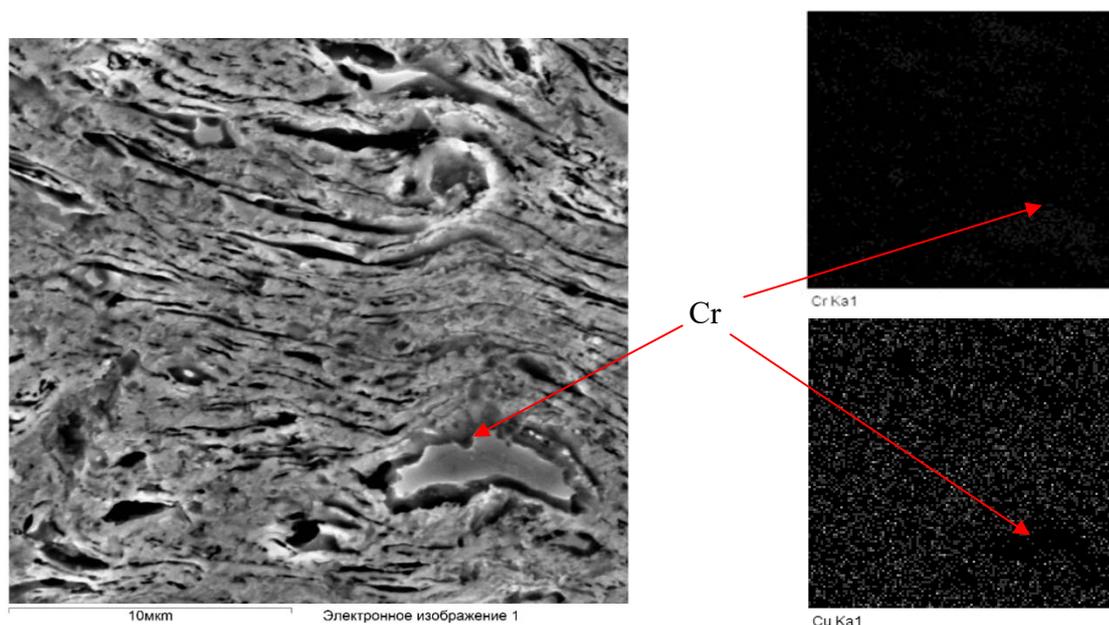


Рис. 3. Структура гранулированной композиции Cu – 20 % Cr

Электроннографическим методом (ПЭМ) установлено наличие в материале следующих фаз: Cr, Fe. Фаза Cr_3C_2 в гранулированных композициях непосредственно после механического легирования не выявлялась, т. к. механическое сплавление к завершению фазовых превращений не приводит, они заканчивались формированием промежуточных соединений типа зон Гинье – Престона.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**.

1. Негативной особенностью формирования механически сплавленных модифицирующих лигатур с высоким содержанием основного компонента для производства модифицированных хромовых бронз является низкая способность к грануляции.

2. Основное воздействие на процесс образования гранулированных композиций с высоким содержанием хрома оказывает температура помольной камеры и соотношение между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой.

3. Оптимальный гранулометрический состав формируется при следующих условиях обработки: ускорение рабочих тел – $120 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$; степень заполнения помольной камеры рабочими телами – 75 %; соотношение между объемами, занимаемыми рабочими телами и шихтой, – 14; время обработки шихты – 8 ч; температура помольной камеры – 80°C .

4. Определена возможность получения по оптимальному режиму обработки композиций с содержанием основного легирующего компонента – хрома – до 20 %...22,5 %.

УДК 621.791

ВОЗМОЖНОСТИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. ЛЮШИНСКИЙ

ООО «Авиационно-космические технологии»

Москва, Россия

UDC 621.791

POSSIBILITY OF DIFFUSION WELDING FOR JOINTED OF METALLIC AND NON-METALLIC MATERIALS

A. V. LIUSHINSKII

Аннотация. Рассмотрены возможности технологии диффузионной сварки для соединения материалов (металлов и неметаллов), используемых в различных отраслях промышленности. Показаны перспективы применения данной технологии соединения в твердой фазе.

Ключевые слова: диффузионная сварка, промежуточные слои, температура сварки, сварочное давление, разнородные материалы.

Abstract. To inspect the possibility of diffusion welding technology for joint of materials (metals and non-metals) to using at distinguish industries. To show the perspectives of application of this technology of solid state.

Keywords: diffusion welding, intermediate layers, temperature of welding, force of welding, heterogeneous materials.

Тенденция развития современных отраслей промышленности – атомной, энергетической, авиационно-космической, точного машиностроения и др. – характеризуется применением в прецизионных конструкциях большого количества металлических и неметаллических материалов. Поэтому основная проблема при сборке и производстве таких конструкций – обеспечить качественное соединение сборочных единиц и деталей, выполненных из разнородных материалов, в единый механизм, функционирующий в течение длительного периода эксплуатации.

Из-за металлургической несовместимости разнородных материалов сварка плавлением в большинстве случаев не может быть применена, а сварка металлов с неметаллами или композитами практически невозможна. Процесс пайки не всегда отвечает необходимым требованиям по прочности, герметичности, точности сборки.

Диффузионная сварка является одним из тех технологических процессов, которые могут решить множество задач, возникающих при изготовлении изделий, состоящих из разнородных материалов [1, 2].

Преимущество диффузионной сварки по отношению к другим технологиям

сварки заключается в том, что она обеспечивает качественное соединение материалов в твердом состоянии как в однородном, так и в разнородном сочетании. Диффузионная сварка за счет ряда отличий в протекании диффузионных процессов и возможности пластически деформировать приконтактные поверхности позволяет соединять детали и сборочные единицы из разнородных материалов в равнопрочные узлы гарантированного качества.

В работе приведены некоторые примеры применения технологии диффузионной сварки при соединении наиболее применяемых металлических и неметаллических материалов.

Все экспериментальные работы по диффузионной сварке различных материалов проводили на специализированной вакуумной установке СДВУ-50 с радиационным нагревом. Гарантированный вакуум – не хуже $1,33 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Металлографические исследования и механические испытания сварных образцов выполняли по стандартным методикам.

Титановые сплавы между собой соединяются диффузионной сваркой относительно легко. Обычно температуру сварки выбирают в диапазоне $800\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. в области температур рекристаллизации титановых сплавов. Учитывая низкий предел текучести титана и значительное влияние на него температуры, сварочное давление выбирают в диапазоне $0,1 \dots 1,0$ кгс/мм². Время сварки составляет от 5 до 30 мин, опять же в зависимости от выбранной температуры и сварочного давления.

Существующие трудности, которые возникают при разработке технологии диффузионной сварки деталей из титановых сплавов, связаны с неконтролируемыми структурными изменениями, протекающими в процессе сварки. Титановые сплавы характеризуются многообразием микроструктур и существенной зависимостью сопротивления деформации от их микроструктурного состояния в интервале температур « $800\text{ }^{\circ}\text{C} \div$ температура окончания $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ превращения». У сплавов с мелкозернистой равноосной структурой сопротивление высокотемпературной деформации значительно меньше по сравнению со сплавами с крупнозернистой пластинчатой структурой. Поэтому за счет регулирования исходной микроструктуры свариваемых образцов можно управлять параметрами режима диффузионной сварки, а значит, и качеством сварных соединений. Другими словами, механические свойства титановых сплавов особенно чувствительны к изменениям структуры, поэтому необходимо управлять этими изменениями или ограничивать их для получения высокой прочности и пластичности как самого сплава, так и сварного соединения. В частности, на примере сплава ОТ4 показано [1], что при диффузионной сварке титановых сплавов с исходной равноосной мелкозернистой (глобулярной) микроструктурой величина накопленной деформации свариваемых заготовок может быть снижена более, чем в 2 раза, если процесс сварки выполнять в интервале температур полиморфного

превращения (≈ 950 °С), при этом сварочное давление может быть использовано только на первом этапе для образования физического контакта площадью не менее 50 % от номинальной, а затем без давления производить изотермический отжиг для обеспечения развития объемного взаимодействия. Длительность отжига зависит от температуры, например, при температуре выше окончания полиморфного превращения (≈ 1000 °С) она сокращается почти в 10 раз по сравнению с отжигом при 950 °С.

Наблюдаемый эффект следует связывать не с величиной температуры, а в большей степени с развитием процессов диффузионного обмена при переходе через интервал полиморфного превращения, когда собственные внутренние напряжения будут достигать максимальных значений при минимальном сопротивлении сплава высокотемпературной деформации. Как следствие этого, наблюдается интенсивное смятие рельефов поверхности с увеличением зоны взаимодействия, что положительно сказывается на образовании соединения.

Большие сложности возникают при соединении титановых сплавов со сталями, например, со сталью 08X18H10T. Только применение промежуточного слоя на основе ультрадисперсного порошка никеля позволяет получать герметичные соединения с прочностью 50...60 кгс/мм² [2].

О роли промежуточных слоев при получении соединений диффузионной сваркой целесообразно остановиться отдельно. В качестве промежуточных слоев применяют, как правило, пластичные металлы – золото, серебро, никель, медь, алюминий и другие в виде фольги, проволоки, порошков, пленок, наносимых на соединяемые поверхности гальванически или в виде вакуумных конденсатов.

Технологически обоснованное применение промежуточных слоев при диффузионной сварке значительно расширяет возможности этого способа и номенклатуру свариваемых материалов, являясь, порой единственным или предпочтительным вариантом получения надежных соединений, отвечающих требуемым физико-механическим свойствам при конструировании изделий на основе разнородных материалов.

Промежуточные слои могут выполнять две главные функции при формировании соединения диффузионной сваркой:

- 1) снижение и, в ряде случаев, устранение химической неоднородности и термодинамической нестабильности в зоне соединения металлургически несовместимых материалов;

- 2) исключить или значительно уменьшить термодиффузионное воздействие на свариваемые материалы.

К первой группе относятся слои, предотвращающие непосредственное взаимодействие элементов соединяемых материалов, склонных к образованию в зоне взаимодействия интерметаллидов и хрупких фаз, а также снижающие напряжения в сварном шве из-за разницы в ТКЛР свариваемых материалов. Вторая группа включает слои, «помогающие» снизить температуру и сварочное

давление при сварке при одновременном обеспечении необходимых прочностных или иных свойств сварных соединений.

Накоплен определенный опыт применения в качестве промежуточного слоя ультрадисперсного порошка никеля, получаемого термическим разложением муравьинокислого или щавелевокислого никеля, и наносимого на свариваемые поверхности в виде пористой прокатанной ленты. Такие слои хорошо зарекомендовали при изготовлении магнитных систем (соединение постоянных магнитов с магнитопроводом и арматурой), бурового и специального инструмента (соединение твердых сплавов между собой и твердого сплава со сталями), деталей из жаропрочных сталей и др. Параметры промежуточного слоя: толщина – 65 мкм, пористость – 55 %.

Качество сварного соединения, получаемого через порошковый промежуточный слой, определяется в равной степени процессами, происходящими при спекании этого слоя и сопровождающими его припекание к поверхности основного (компактного) материала.

В процессе спекания постоянно уменьшается общая поверхность частиц порошка и увеличивается поверхность их соприкосновения. Сокращение общей поверхности приводит к уменьшению поверхностной и общей свободной энергии системы. Иными словами, движущей силой процесса спекания дисперсных порошков является снижение термодинамического потенциала системы. При этом, чем больше их начальная поверхностная энергия, тем значительнее движущая сила процессов спекания порошков и их припекания к свариваемым поверхностям.

При создании *навигационного оборудования* летательных аппаратов широко применяют приборы и устройства, принцип работы которых основан на использовании магнитных полей. Основным узлом таких приборов является магнитная система, выполненная из постоянного магнита, магнитопровода и арматуры.

Использование при диффузионной сварке постоянных магнитов типа ЮНДК, Fe–Nd–В со сталями 10880, 27КХ и др., промежуточного слоя в виде пористой ленты из ультрадисперсного порошка никеля, полученного термическим разложением формиатов или оксалатов никеля, обеспечило их соединение при температуре $T = 550$ °С и сварочном давлении $P = 2$ кгс/мм², т. е. ниже температуры Кюри и без макропластической деформации. При этом прочность составила не менее 30 кгс/мм² [2].

В *двигателестроении* остро стоит вопрос соединения жаропрочных сплавов между собой, т. к. не все эти сплавы успешно свариваются аргоно-дуговой сваркой или электронным лучом. А при необходимости соединить такой сплав с композитами типа TiNc или SiC диффузионная сварка незаменима.

Сварку образцов из сплава ВЖЛ-12 и стали 13X11H2B2MФ (ЭИ961) производили через никелевую фольгу НП-1 толщиной 0,5 и 0,1 мм. Параметры режима: $T_{св} = 1140$ °С, $P = 20$ МПа, $t = 20$ мин. После сварки остаточная пластическая деформация образцов из 13X11H2B2MФ составляла не более 7 %,

а образец из ВЖЛ-12 не имел пластической деформации.

Образцы подвергали термической обработке при $T = 530$ °С, а затем производили их механические испытания на разрыв. Прочность $\sigma_e > 670$ МПа и разрушение происходит по телу образца, а не по зоне соединения. Микроструктура зоны сварки внутренних дефектов не выявила.

В результате экспериментов по сварке сплава ЭП866 с композитом TiNC и их механическим испытаниям на разрыв при комнатной температуре выбран следующий режим: температура $T = 1050$ °С...1100 °С, сварочное давление $P = 1,5...2,0$ кгс/мм², время сварки – от 40 мин до 1 ч, скорости нагрева и охлаждения не превышали 10 °С /мин. При этом пластическая деформация образцов из композита отсутствует, а у образцов из ЭП866 составляет около 7 %. Прочность соединения (среднее значение) $\sigma_e = 100$ кгс/мм². Разрушение сварного соединения происходит по карбонитриду титана.

Соединение стекла С-48 с молибденовым сплавом ЦМ2А, производимого при $T = 800$ °С, $P = 1$ кгс/мм² и $t = 20$ мин, обеспечивает получение равнопрочного герметичного сварного шва с минимальными внутренними напряжениями, которые исчезают после проведения дополнительной термической обработки.

Для реализации разрабатываемых технологий диффузионной сварки разработано современное специализированное вакуумное оборудование с возможностью автоматизации задания и контроля основных параметров режима, а также для сварки крупногабаритных изделий.

Даже столь минимальное количество примеров о возможностях диффузионной сварки для соединения разнородных материалов показывает, что эта технология обладает потенциалом и перспективами для применения в производстве прецизионной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Казаков, Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 312 с.

2. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – Москва: Академия, 2006. – 208 с.

E-mail: nilsvarka@yandex.ru.

УДК 621.791

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КАК МЕТОД ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ

*А. В. ЛЮШИНСКИЙ¹, В. Е. РОГАЛИН², Т. В. МАЛИНСКИЙ²,
Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО³*

¹ООО «Авиационно-космические технологии»

Москва, Россия

²Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

Санкт-Петербург, Россия

³Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

UDC 621.791

LASER ELABORATION AS METHOD OF INTENSIFICATION OF DIFFUSION PROCESSES AT PRESSURE WELDING

A. V. LIUSHINSKII, V. E. ROGALIN, T. V. MALINSKII, F. I. PANTELEYENKO

Аннотация. Показано влияние плотности энергии лазерного излучения на формирование субмикронных структур на поверхностях, подлежащих диффузионной сварке. Установлено, что формирование диффузионно-сварного соединения через эти структуры отличается от формирования такого же соединения через микронеровности, полученные механической обработкой. Высказано предположение, что эти различия связаны с модификацией поверхности лазерным излучением.

Ключевые слова: диффузионная сварка, лазерная обработка, температура, сварочное давление, субмикронные структуры.

Abstract. The influence of laser radiant energy density on formation of submicron structures on the surfaces, which are subject to diffusion bonding, is demonstrated. It is established that the formation of diffusion-bonding joint through these structures differs from the formation of the same joint through the microroughnesses obtained by mechanical processing. A supposition is expressed that these differences are connected with a modification of the surface by the laser emission.

Keywords: diffusion welding, laser treatment, temperature, welding force, submicron structures.

Достижение необходимых физико-механических свойств соединений, получаемых диффузионной сваркой (ДС), возможно путем обеспечения диффузионного обмена между свариваемыми поверхностями и формирования достаточной диффузионной зоны [1, 2]. Для каждой пары материалов она будет оптимальной для обеспечения прочностных характеристик соединения.

Интенсификация ДС осуществляется варьированием параметрами процесса, либо использованием:

– применения промежуточных слоев (гальванических или напыленных [3], фольг, ультрадисперсных порошков [4]);

– воздействия в зоне сварки ультразвуковых колебаний [5] либо электростатического поля [6];

– предварительного формирования на свариваемых поверхностях упорядоченных структур при воздействии электронно-лучевым, ионно-плазменным или лазерным излучением [7].

В последние годы самым простым по технике исполнения и востребованным по достигаемым результатам является метод активации свариваемых поверхностей лазерным излучением, в частности, с учетом относительной дешевизны и доступности применяемого оборудования.

В [7–10] показано, что создание на свариваемых поверхностях рельефа определенной формы путем их лазерной обработки приводит к повышению прочностных свойств соединений из сталей 08X18H10T, 09X17H-Ш, титанового сплава типа 2В, никелевого сплава ХН55МВЦ, полученных диффузионной сваркой. Авторы этих работ исследуют влияние плотности энергии излучения и скорости сканирования лазерным лучом на формирование субмикронных структур, а также рассматривают источники лазерного излучения. При этом не установлена связь получаемых субмикронных структур с их пластической деформацией при ДС, а также ее роли в формировании физического контакта, активации и объемного взаимодействия. Не конкретизируется форма субмикронных структур, чтобы активация свариваемых поверхностей протекала с максимальной скоростью, интенсифицируя тем самым диффузионные процессы в зоне контакта.

Цель работы – исследование влияние вида и формы субмикронных структур на их ползучесть и формирование физического контакта в процессе ДС. Оценены эффекты, возникающие и сопутствующие процессу лазерной обработки. Они должны быть учтены при последующей ДС. Для достижения результата необходимо сравнить поверхностные структуры, подлежащие ДС, и полученные как механической, так и лазерной обработками.

В исследованиях использовали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и высотой 25 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Торцы образцов после токарной обработки имели параметр шероховатости $R_z = 1,2$ мкм. Лазерную обработку торцов проводили на лабораторной установке с плотностью энергии излучения $2,1$ Дж/см² (режим 1), $3,2$ Дж/см² (режим 2) и $4,3$ Дж/см² (режим 3), диаметр пятна 220 мкм. Обработку свариваемых торцов осуществляли попарно по двум вариантам: сканирование лазерного луча в одном направлении и сканирование луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях. После проведения лазерной обработки производили замер R_z и R_a каждого образца на аппарате «Профилограф – профилометр 252». Данные сведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения шероховатости поверхностей образцов после токарной и лазерной обработок

Номер образцов	Режим обработки	R_z , мкм (после токарной обработки)	R_z , мкм (после лазерной обработки)	R_a , мкм (после лазерной обработки)
1-1	Не обрабатывались	1,2	–	–
1-2		1,2	–	–
2-1	Режим 1	1,2	13,6	2,2
2-2		1,2	13,6	2,2
3-1	Режим 2	1,2	14,5	2,4
3-2		1,2	14,5	2,4
4-1	Режим 3	1,2	43,8	8,1
4-2		1,2	43,8	8,1
5-1	Режим 3 + обработка во взаимно перпендикулярном направлении	1,2	45,5	8,6
5-2		1,2	45,5	8,6

ДС образцов производили на специализированной установке СДВУ-50 с обеспечением вакуума не хуже $1,33 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Сборку образцов под сварку осуществляли только по поверхностям с одинаковым вариантом лазерной обработки. Предварительно сваривали пару «образец без лазерной обработки – контрольный образец». Параметры режима ДС: температура $T_{св} = 800$ °С, сварочное давление $P_{св} = 2$ кгс/мм², время выдержки $t = 15$ мин. Параметры выбраны исходя из того, что равнопрочное соединение ($\sigma_{св} \approx 55$ кгс/мм²) образцов из стали 12Х18Н10Т без дополнительной обработки после токарной операции ($R_z = 1,2$ мкм) получали при $T = 1000$ °С, $P = 2$ кгс/мм² и $t = 15$ мин [3].

Величину сварочного давления контролировали динамометрической скобой ДС-5, давление прилагали при достижении заданной температуры ДС. Нагрев образцов до температуры ДС и последующее охлаждение осуществляли со скоростью 20 °С/мин, что фиксировали термопарой ППР-1.

Фрактографические исследования проводили на РЭМ Tescan Vega 3. Свойства поверхностного слоя контактных поверхностей определяются структурой, шероховатостью, характеризуемой микрогеометрией, наличием остаточных напряжений, микротвердостью, наличием оксидов и др. [1, 2]. После механической обработки на поверхности, подлежащей ДС, появляется макроскопическая (волнистость) и микроскопическая (шероховатость) геометрическая неоднородность. Микровыступы в зависимости от чистоты обработки поверхности имеют высоту от 0,05 до 200 мкм. В большинстве случаев микровыступы в вертикальном сечении имеют форму треугольной пирамиды с различными значениями основания и радиуса закругления вершины.

Каждому виду механической обработки соответствует определенный

диапазон значений углов β , причем конкретному классу обработки поверхности соответствует определенное значение угла β . Профиль поверхностей стальных образцов, подвергнутых различной механической обработке, показывает, что повышение класса обработки поверхности приводит к уменьшению угла β [2].

Образование физического контакта при ДС в твердой фазе происходит, в первую очередь, в результате сближения соединяемых поверхностей, достигаемое путем пластической деформации микровыступов и приповерхностных слоев, сопровождаемой объемной деформацией металла [1, 2, 11]. Каждая поверхность представляет собой ансамбль микровыступов, имеющих различную высоту и форму, характерные для конкретного класса обработки. При деформации ансамбля микровыступов происходит непрерывное перераспределение контактных напряжений от точки к точке, т. к. по мере развития процесса в деформацию вовлекаются новые микровыступы и соответствующие им приповерхностные слои металла.

При ДС деформация микровыступов составляет величину порядка 70 %...80 % [1], причем деформация осуществляется при высоких температурах, когда активно протекают процессы миграции границ зерен, рекристаллизации, фазовых превращений и т. д., приводящие к изменению физико-механических свойств в макро- и микрообъемах.

Результаты экспериментальных исследований влияния геометрических параметров модельных микровыступов на ползучесть дали основания авторам [1, 2, 11] констатировать, что сглаживание микровыступов, сформированных механической обработкой, и образование физического контакта при диффузионной сварке будут происходить тем интенсивнее, чем меньше угол β . Исследования, проведенные в [11], показали, что прочность диффузионно-сварных соединений, поверхности которых предварительно обработаны лазерным излучением с различной плотностью энергии, повышается с увеличением высоты микровыступов и увеличением угла β .

Результаты показали, что на образце 1 следы от механической обработки практически не претерпели изменений под действием температуры и давления, они идентичны исходному состоянию. ДС образцов 2 и 3 происходила по микронеровностям, сформированным лазерным излучением (выплескам). Они, в основном, шарообразны, имеют небольшую высоту, хаотично разбросаны по поверхности и соединение происходило по наиболее высоким микронеровностям за счет их пластической деформации. С увеличением плотности энергии выброс из центральной части пятна усиливается, а глубина кратера и высота бруствера увеличиваются. Возвышения представляют собой микровыступы конусообразной формы с закругленными оплавленными вершинами. Резкое повышение прочности у образцов 4 и 5 вызвано тем, что микронеровности, сформированные лазерным излучением, имеют максимальную высоту, по сравнению с поверхностями других образцов,

и конусообразную форму, причем с минимальным углом у вершины, т. е. угол β в данном случае максимальный.

Первым признаком того, что между свариваемыми материалами началось объемное взаимодействие является наличие чашеобразного излома на поверхности образца после механических испытаний на прочность. Применительно к образцам 4 и 5 при большом увеличении видно, что на некоторых микровыступках имеются такие чашеобразные изломы (рис. 1).

Объяснение тому, почему интенсифицируется развитие физического контакта и активация объемного взаимодействия на микровыступках, сформированных лазерным излучением, заключается, по-видимому, в его многофакторном воздействии на обрабатываемую металлическую поверхность. Лазерное излучение позволяет создавать большие градиенты температур (быстрый нагрев тонкого поверхностного слоя металла до температур плавления и такое же быстрое охлаждение до комнатной температуры), которые способствуют образованию новых наноструктур с повышенной дефектностью. В кристаллической решетке повышается уровень напряжений, увеличивается плотность дислокаций. Происходит измельчение исходного зерна, тем самым облегчается пластическая деформация в ультрамелкозернистом материале. Коэффициент диффузии по границам зерен на порядки превышает соответствующие значения в объеме зерен [8–11]. Все это в итоге приводит к быстрому развитию объемного взаимодействия в диффузионной зоне.

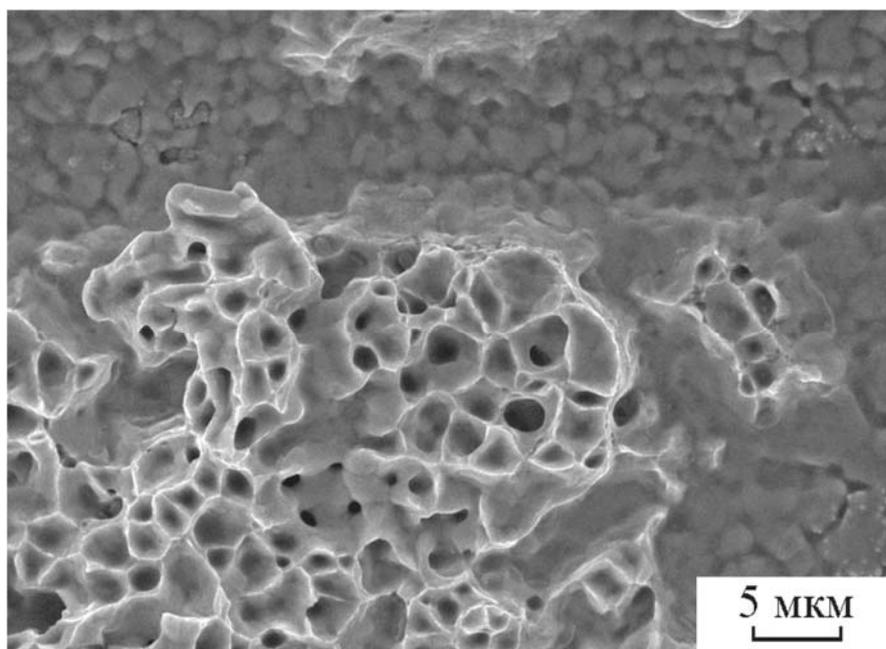


Рис. 1. Фрактограмма излома образца 5

Необходимо иметь в виду, что один и тот же режим лазерной обработки, примененный к поверхностям с различным уровнем шероховатости, может дать различную конечную величину R_z поверхностей, подлежащих ДС. А это, в свою

очередь, приведет к тому, что кинетика формирования физического контакта и возникновения активных центров будет отличаться при одних и тех же параметрах ДС. Кроме того, необходимо учитывать способность обрабатываемой поверхности повышать или понижать микротвердость под воздействием лазерного излучения, а также создавать дополнительный оксидный слой на поверхности.

Выводы.

1. Режим лазерной обработки поверхностей, подлежащих ДС, должен обеспечивать формирование микровыступов максимальной высоты и конусообразной формы.

2. Для выборов оптимальных режимов ДС необходимо учитывать процессы, происходящие с материалом под воздействием лазерного излучения, в частности, возможность подкалки участков плавления, неравномерность распределения величин микротвердости на микровыступах и во впадинах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красулин, Ю. Л.** О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – № 1. – С. 89–97.
2. **Лариков, Л. Н.** Диффузионные процессы в твердой фазе / Л. Н. Лариков, В. Р. Рябов, В. М. Фальченко. – Москва: Машиностроение, 1975. – 192 с.
3. **Казаков, Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов / Н. Ф. Казаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 312 с.
4. **Люшинский, А. В.** Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – Москва: Академия, 2006. – 208 с.
5. **Конюшков, Г. В.** Специальные методы сварки давлением / Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 632 с.
6. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением / Ю. А. Железнов [и др.] // Письма о материалах. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 45–48.
7. Влияние облучения наносекундными лазерными импульсами на структуру поверхности металлических сплавов / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 6. – С. 5–12.
8. Laser processing of metal alloys for diffusion welding / Yu. A. Vashukov [et al.] // Applied Physics. – 2019. – № 1. – P. 82.
9. Влияние предварительной лазерной обработки поверхности на механические свойства диффузионного сварного соединения железоникелевого сплава / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2020. – № 3. – С. 40–47.
10. Изменение топографии поверхности бронзы при облучении сканирующим импульсным наносекундным лазерным излучением / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2019. – № 1. – С. 27–34.
11. **Люшинский, А. В.** Влияние предварительной лазерной обработки поверхностей образцов стали 12X18H10T на их диффузионную сварку / А. В. Люшинский, В. Н. Петровский, В. Н. Ёлкин // Физика и химия обработки материалов. – 2021. – № 5. – С. 21–29.

УДК 621.791

О ТЕРМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ**А. И. ЛЯПИН**Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.791

ON THERMAL IONIZATION AND WELDING ARC TEMPERATURE**A. I. LYAPIN**

Аннотация. Проведено сравнение оригинальной и упрощенной формул Сага для термической ионизации газа. Показано, что применимость упрощенной формулы ограничена определенными значениями параметров. Также показано, что термическая ионизация не может являться основным процессом генерации свободных носителей электрического заряда в дуге. Экспериментально получено, что равновесная температура дуги в воздухе между вольфрамовым и угольным электродами при токе 100 А не может превышать 3660 К.

Ключевые слова: сварочная дуга, термическая ионизация, степень ионизации, упрощенная формула Сага, равновесная температура дуги.

Abstract. The original and simplified Saga formulas for thermal ionization of gas are compared. It is shown that the applicability of the simplified formula is limited by certain parameter values. It is also shown that thermal ionization cannot be the main process of generation of free charge carriers in the arc. It has been experimentally obtained that the equilibrium temperature of the arc in air at a current of 100 A cannot exceed 3660 K.

Keywords: welding arc, thermal ionization, degree of ionization, simplified Saga formula, arc equilibrium temperature.

О применимости упрощенной формулы Сага для термической ионизации к сварочной дуге. В работах по дуговому разряду [1, 2] и др. при обсуждении элементарных процессов генерации свободных носителей заряда рассматривается термическая ионизация и приводится известная формула Сага для степени ионизации газа α :

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{p} \cdot T^{2,5} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{k \cdot T}\right), \quad (1)$$

где p – давление газа, мм рт. ст.; T – абсолютная температура; e – заряд электрона; U_i – эффективный потенциал ионизации молекул газа; k – постоянная Больцмана.

Затем, пренебрегая в знаменателе величиной α^2 относительно единицы, формула (1) записывается в следующем виде:

$$\alpha^2 = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{p} \cdot T^{2,5} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{k \cdot T}\right). \quad (2)$$

Из упрощенной формулы (2) получается выражение для степени термической ионизации газа в дуге:

$$\alpha = 1,55 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{p^{0,5}} \cdot T^{1,25} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{2 \cdot k \cdot T}\right). \quad (3)$$

Очевидно, что оригинальная формула Сага (1) приводит к другому выражению для α . Действительно, правые части сравниваемых формул (1) и (2) одинаковые, обозначим их буквой X . Тогда из формулы (1) получим для степени ионизации

$$\alpha(1) = \sqrt{\frac{X}{1+X}}. \quad (4)$$

В формуле (4) при любых значениях X (т. е. потенциала ионизации, давления и температуры) степень ионизации не превысит единицы.

Упрощенная же формула (2) приводит к следующему результату:

$$\alpha(2) = \sqrt{X}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что упрощенная формула (3) применима лишь в ограниченной области значений потенциала ионизации, давления и температуры, в которой α не превышает единицу.

Для наглядности ниже приведены результаты расчетов степени термической ионизации по формулам (1) и (2). Расчеты проведены для дуги, свободно горящей между стальными электродами при атмосферном давлении. В отсутствие каких-либо специфических примесей эффективный потенциал ионизации, входящий в формулы (1)–(3) практически равен потенциалу ионизации железа.

На рис. 1 показаны зависимости степени ионизации $\alpha(1)$, вычисленной по формуле (1), и $\alpha(2)$, вычисленной по формуле (2), от температуры газа.

При температурах до 5000 К значения степеней ионизации $\alpha(1)$ и $\alpha(2)$ отличаются незначительно. Поэтому график начинается с 5000 К.

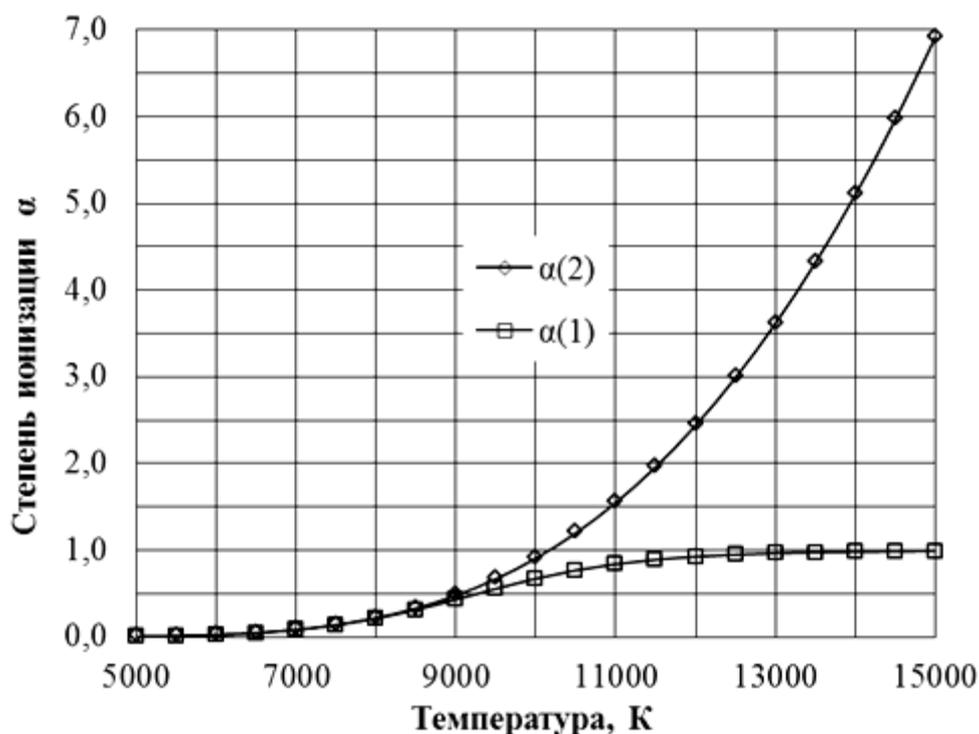


Рис. 1. Зависимости степеней ионизации $\alpha(1)$, вычисленной по формуле (1), и $\alpha(2)$, вычисленной по формуле (2), от температуры газа

Заметное расхождение (в сотых долях процента) в значениях $\alpha(1)$ и $\alpha(2)$ начинается с температуры 7000 К. При температуре 10180 К величина $\alpha(2)$ с точностью до третьего знака после запятой достигает единицы. Дальнейшие результаты расчетов теряют физический смысл, т. к. противоречат определению величины α .

Аналогичные расчеты были проведены для некоторых металлов. Верхние температурные границы $T_{гр}$ применимости упрощенной формулы Сага $\alpha(2)$ при различных давлениях приведены в табл. 1.

Табл. 1. Верхние температурные границы $T_{гр}$ применимости упрощенной формулы Сага $\alpha(2)$ при давлениях $10^5 \dots 10^2$ Па

Металл	Al	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	Ta
$1 \cdot 10^5$	8910	9590	10180	10110	9820	9810	9690	10590
$1 \cdot 10^4$	7245	7870	8450	8395	8155	8160	7985	8745
$1 \cdot 10^3$	6065	6635	7190	7145	6940	6955	6755	7410
$1 \cdot 10^2$	5195	5710	6240	6200	6020	6040	5835	6402

Таким образом, при расчетах степени термической ионизации α определенного газа с помощью упрощенной формулы Сага прежде необходимо определить допустимые значения давления и температуры, при которых α не превышает единицу.

О температуре дуги. Для оценки температуры дуги обычно используется хорошо известное выражение, полученное на основе упрощенной формулы Сага (3):

$$T = 800 \cdot U_i, \quad (6)$$

где U_i – эффективный потенциал ионизации.

Из приведенных выше металлов наибольшим потенциалом ионизации обладает железо $U_i = 7,896$ эВ. При этом значении U_i температура дуги T в парах железа при атмосферном давлении и степень ионизации α равны соответственно $T \approx 6320$ К, $\alpha \approx 3,5$ %. У остальных металлов эти величины будут ниже. В частности, для алюминия $T \approx 4780$ К, $\alpha \approx 1,6$ %. Трудно ожидать получение сварочных токов в сотни ампер и выше при такой степени ионизации. Это может означать, что термическая ионизация не является основным процессом генерации свободных носителей электрического заряда в дуговом разряде.

Для грубой экспериментальной оценки температуры был проведен следующий опыт: в столб дуги, свободно горящей между W и C электродами при атмосферном давлении и токе 100 А, вводили отрезки стальной и вольфрамовой проволок диаметром 2,4 мм. Если первый образец начинал плавиться с первых секунд опыта, то второй не проявлял признаки плавления в течение десятков секунд, превышающих расчетное время плавления. Этот результат позволяет утверждать, что значение равновесной («тепловой») температуры дуги лежит в пределах температур плавления стали и вольфрама ($T_W \approx 3660$ К).

Выводы.

1. При расчетах степени термической ионизации α конкретного газа с помощью упрощенной формулы Сага необходимо прежде определить допустимые значения давления и температуры, при которых α не превышает единицу.

2. Термическая ионизация не может являться основным процессом генерации свободных носителей электрического заряда в дуговом разряде.

3. Значение равновесной («тепловой») температуры дуги, горящей между вольфрамовым и угольным электродами при атмосферном давлении и токе 100 А, лежит в пределах температур плавления стали и вольфрама ($T_W \approx 3660$ К).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – Москва: Машиностроение, 1970. – 336 с.
2. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – Москва: Наука, 1971. – 526 с.

УДК 539.4.016.3:669-1

УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИФФУЗИОННО-СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Т. В. МАЛИНСКИЙ, С. И. МИКОЛУЦКИЙ, В. Е. РОГАЛИН, Ю. В. ХОМИЧ

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

Санкт-Петербург, Россия

UDC 539.4.016.3:669-1

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF DIFFUSION-WELDED ALLOY JOINTS DUE TO PRELIMINARY LASER PROCESSING

T. V. MALINSKIY, S. I. MIKOLUTSKIY, V. E. ROGALIN, YU. V. KHOMICH

Аннотация. Исследовано влияние предварительной лазерной обработки поверхности сплавов наносекундными импульсами на механические свойства их диффузионно-сварных соединений. Показано улучшение предела прочности и относительного удлинения для соединения жаропрочного сплава на основе никеля, а также предела прочности для соединения хромированной бронзы и коррозионно-стойкой стали.

Ключевые слова: лазерная обработка, диффузионная сварка, механические свойства, соединение сплавов, хромированная бронза, наносекундные импульсы.

Abstract. The influence of preliminary laser surface treatment of alloys by nanosecond pulses on the mechanical properties of their diffusion-welded joints has been studied. An improvement in tensile strength and tensile strain has been shown for joining a nickel-based heat-resistant alloy, as well as an improvement in tensile strength for joining zirconium bronze and stainless steel.

Keywords: laser processing, diffusion welding, mechanical properties, alloy joining, zirconium bronze, nanosecond pulses.

Диффузионная сварка широко применяется в различных передовых отраслях промышленности, таких как авиационное машиностроение, аэрокосмические технологии, атомная энергетика, для изготовления сложных деталей и устройств, где требуется соединение разнородных материалов (металлов, сплавов, керамик). В последнее время наблюдается тенденция к повышению доли диффузионно-сварных соединений в общем объеме сварочных работ, поэтому актуальными задачами на сегодняшний день являются улучшение качества сварного шва и сокращение энергетических затрат при диффузионной сварке. Решение данных задач связано с развитием новых методов предварительной подготовки поверхностей свариваемых материалов, например, лазерной обработкой наносекундными импульсами [1, 2], которая представлена в работе.

Одним из возможных способов повышения прочности диффузионно-сварного соединения является формирование на свариваемых поверхностях структур микронного и субмикронного масштаба. Ранее для этого применялось нанесение покрытий [3, 4], использование наноструктурированных

металлических прослоек или тонких слоев порошкообразных материалов [5, 6], а также создание на свариваемых поверхностях упорядоченного рельефа за счет механической [7] или лазерной [8] обработки. В [8, 9] было продемонстрировано, что лазерное структурирование поверхности материалов с их последующей диффузионной сваркой может приводить к увеличению прочностных характеристик таких соединений. Помимо этого, преимуществами применения лазерного излучения для предварительной обработки материалов могут стать закаливание и повышение износостойкости материала, очистка исходной поверхности от примесей и загрязнений, увеличение прочности и устойчивости шва к окислению.

Цель работы – исследование влияния предварительной лазерной обработки поверхности наносекундными импульсами на механические свойства диффузионно-сварных соединений жаропрочного никелевого сплава ХН55МВЦ и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с хромированной бронзой. Такие сплавы играют важную роль в авиационной, космической и атомной промышленности, как материал деталей газовых реактивных двигателей, в том числе турбин. Стоит отметить, что жаропрочные сплавы при комнатной температуре обычно очень твердые и хрупкие, их механическая обработка оказывается очень сложной и дорогой.

В качестве метода обработки поверхности использовалось прямое лазерное наноструктурирование [10, 11] на базе наносекундного NdYAG-лазера, генерирующего импульсно-периодическое излучение с длиной волны 355 нм. Достаточно короткая длина волны УФ-диапазона позволяет эффективно обрабатывать большое количество материалов, в частности, используемые в работе коррозионно-стойкие сплавы. Обрабатываемые образцы имели форму цилиндров диаметром 20 мм и высотой 15 мм. Чтобы исключить отрицательное влияние окисления поверхности при лазерном облучении, весь процесс обработки материалов производился в герметичной камере с возможностью напуска инертного газа под давлением в 1,5 атм.

Лазерная обработка производилась путем сканирования лазерным лучом по поверхности образца в прямом и обратном направлениях с шагом 10 мкм по горизонтали и 30 мкм по вертикали. Скорость сканирования составляла либо 1 мм/с, либо 0,5 мм/с, длительность импульсов была 10 нс, частота следования 100 Гц. Плотность энергии лазерного импульса варьировалась от 1 до 3 Дж/см². После лазерной обработки образцы (вместе с исходными необработанными для сравнительного исследования) помещали в герметичный контейнер, в котором производилась диффузионная сварка в условиях горячего изостатического прессования (ГИП) в газостате HIRP (Abra, Швейцария). После этого полученные соединения подвергались испытаниям на статическое растяжение при комнатной температуре на разрывной машине ИР 5143-200 (ООО «ЗИП», Россия).

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1. Образцы из жаропрочного никелевого сплава обрабатывались при плотностях энергии 2 и 3 Дж/см², причем в каждом случае обе свариваемые поверхности, в отличие от соединения нержавеющей стали и хромированной бронзы.

Бронза и сталь обрабатывались при плотностях энергии в лазерном импульсе 1 и 2 Дж/см², причем был случай обработки только одного образца. Диффузионная сварка проводилась при давлении в 160 МПа, температурах 1160 °С и 1000 °С и времени выдержки около 3 ч.

Табл. 1. Механические свойства диффузионно-сварных соединений коррозионно-стойких сплавов с режимами лазерной обработки поверхности

Материал 1	Режим лазерной обработки, Дж/см ²	Материал 2	Режим лазерной обработки, Дж/см ²	Температура диффузионной сварки, °С	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
ХН55МВЦ	–	ХН55МВЦ	–	1160	567	42
ХН55МВЦ	2	ХН55МВЦ	2	1160	631	51
ХН55МВЦ	3	ХН55МВЦ	3	1160	633	51
ХН55МВЦ	–	ХН55МВЦ	–	1000	495	13
ХН55МВЦ	2	ХН55МВЦ	2	1000	640	34
ХН55МВЦ	3	ХН55МВЦ	3	1000	480	10,5
12Х18Н10Т	–	БрХ1	–	1160	245	–
12Х18Н10Т	2	БрХ1	–	1160	241	–
12Х18Н10Т	2	БрХ1	1	1160	258	–

Из табл. 1 видно, что при температуре диффузионной сварки в 1160 °С лазерная обработка при 2 Дж/см² приводит к увеличению предела прочности сварного соединения на 12 % по сравнению с необработанными образцами, причем повышение плотности энергии лазерного излучения до 3 Дж/см² не способствует какому-либо заметному увеличению предела прочности. Если же уменьшить температуру сварки до 1000 °С, то предел прочности у соединений с необработанными образцами и обработанными в режиме 3 Дж/см² оказывается гораздо ниже, чем в случае лазерной обработки при 2 Дж/см². Похожая тенденция, но более заметная в процентном соотношении, наблюдается при исследовании относительного удлинения диффузионно-сварных соединений ХН55МВЦ (см. табл. 1). Такой результат свидетельствует о возможности улучшения механических свойств сварных соединений жаропрочного никелевого сплава за счет предварительной лазерной обработки наносекундными импульсами, а также позволяет снизить температуру диффузионной сварки в условиях ГИП на 160 °С при сохранении механических характеристик сварного соединения.

В случае испытаний диффузионно-сварных соединений коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и хромированной бронзы БрХ1 было получено незначительное улучшение предела прочности в случае обработки сразу двух поверхностей свариваемых образцов (см. табл. 1), когда как обработка при 2 Дж/см² только поверхности нержавеющей стали не привела к положительному результату.

Причиной улучшения механических свойств сварных соединений может стать появление низкотемпературной сверхпластичности [12, 13], способности

некоторых металлов с мелкозернистой структурой сильно деформироваться в определенном диапазоне температур в результате предварительной лазерной обработки поверхности. Например, в [13] жаропрочный сплав Инконель 718 при среднем размере зерен около 6 мкм достигает эффекта сверхпластичности при 980 °С, а при 0,3 мкм – демонстрирует эффект уже при 650 °С [14]. Помимо этого, в [15] показано, что зернограничная диффузия может на порядки превышать значения в объеме зерен. Таким образом, формирование поверхностных микро- и наноструктур может улучшить механические свойства соединения как за счет большей плотности границ зерен, приводящей к более активной диффузии в материале, так и в результате эффекта низкотемпературной сверхпластичности мелкозернистого материала.

Другой причиной улучшения механических свойств сварного соединения может являться более равномерное распределение степени деформации в соединениях с предварительной лазерной обработкой поверхности, приводящее к более эффективному диффузионному захлопыванию пор в зоне соединения. Исследование равномерности соединения образцов титанового сплава и нержавеющей стали, полученного сваркой давлением, проведено в [16], в которой была показана возможность делокализации деформации за счет изменения топографии поверхности прослойки.

В данной работе вследствие малой глубины проникновения лазерного излучения благодаря короткой длине волны происходит быстрый нагрев и последующее быстрое охлаждение тонкого приповерхностного слоя, что приводит к образованию поверхностных структур с характерным размером менее 100 нм. И, как уже было отмечено выше, это влечет за собой улучшение механических характеристик сварного соединения после предварительной лазерной обработки. Помимо этого, в [17] было показано, что меньшим плотностям энергии соответствует меньший характерный размер поверхностных структур. Это согласуется с данными табл. 1, согласно которым при температуре сварки в 1000 °С более прочное диффузионно-сварное соединение получается при 2 Дж/см². Таким образом, есть возможность эффективного влияния на механические свойства сварного соединения за счет оптимизации параметров облучения для конкретного материала.

В работе показана возможность улучшения механических свойств диффузионно-сварных соединений: увеличение предела прочности более 10 %, увеличение относительного удлинения более 20 %, после предварительной лазерной обработки свариваемой поверхности наносекундными импульсами УФ-диапазона. Также продемонстрирована возможность снижения температуры диффузионной сварки в условиях ГИП на 160 °С при сохранении прочностных характеристик сварного соединения.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (Проект № 0777-2020-0015 и Проект № 0057-2019-0005).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миколуцкий, С. И.** Влияние лазерного УФ-излучения наносекундной длительности на структуру и адгезионные свойства металлов и сплавов / С. И. Миколуцкий, Ю. В. Хомич // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 2. – С. 159–165.
2. Лазерное травление германия / В. Ю. Железнов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47, вып. 14. – С. 18–20.
3. Coating materials characteristics for plasma treatment of metals obtained through diffusion doping of powders based on austenite class steels / F. I. Pantsialeynka [et al.] // Key Engineering Materials. – 2019. – Vol. 843. – P. 141–146.
4. Формирование покрытий из самофлюсующегося порошка на основе сталей аустенитного класса с добавлением молибдена / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 95–100.
5. **Lutfullin, R.Ya.** Solid-phase joint formation in Ti–6Al–4V alloy under conditions of low temperature superplasticity / R.Ya. Lutfullin, M. Kh. Mukhametrakhimov // Rev.Adv.Mater.Sci. – 2010. – Vol. 25, № 2. – P.142–147.
6. **Люшинский, А. В.** Соединение деталей из жаропрочных сплавов диффузионной сваркой. Часть 1 / А. В. Люшинский // Сварочное производство. – 2016. – № 7. – С. 17–22.
7. **Пешков, В. В.** Влияние микроструктуры контактных поверхностей на образование соединения при диффузионной сварке титана / В. В. Пешков, А. Б. Булков, С. М. Ларсов // Вестн. ВГТУ. – 2017. – № 2. – С. 91–95.
8. **Ёлкин, В. Н.** Диффузионная сварка разнородных металлов в условиях горячего изостатического прессования / В. Н. Ёлкин, В. П. Гордо, В. В. Мелюков // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та (ПНИПУ). Сер. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 68–72.
9. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки / Ю. А. Вашуков [и др.] // Прикладная физика. – 2019. – № 1. – С. 82–87.
10. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением / Ю. А. Железнов [и др.] // Письма о материалах. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 45–48.
11. Влияние облучения наносекундными лазерными импульсами на структуру поверхности металлических сплавов / В. Н. Ёлкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 6. – С. 5–12.
12. Низкотемпературная сверхпластичность металлических материалов / Р. З. Валиев [и др.] // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 301, № 4. – С. 864–866.
13. **Mahoney, M. W.** Superplastic properties of alloy 718. Superalloy 718 / M. W. Mahoney // Metallurgy and Applications. Ed. Loria E.A. TMS. – 1989. – P. 391–405.
14. Formation of micro-, submicro- and nanocrystalline structures in nickel-base alloys / V. A. Valitov [et al.] // Proceedings of the First Joint International Conference «Recrystallisation and Grain Growth», Springer-Verlag. – 2001. – P. 563–568.
15. **Мухаметрахимов, М. Х.** Сварка давлением наноструктурных листов из титанового сплава Ti–6Al–4V в условиях низкотемпературной сверхпластичности / М. Х. Мухаметрахимов // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3, № 4. – С. 276–279.
16. **Хазгалиев, Р. Г.** Твердофазное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через наноструктурированную прослойку из никелевого сплава / Р. Г. Хазгалиев, М. Х. Мухаметрахимов // Перспективные материалы. – 2011. – № 12. – С. 529–534.
17. **Хомич, В. Ю.** Образование периодических наноразмерных структур на поверхности твердых тел при фазовых и структурных превращениях / В. Ю. Хомич, В. А. Шмаков // Докл. Академии наук. – 2012. – Т. 446, № 3. – С. 276–278.

E-mail: mikolserg@mail.ru; v-rogalin@mail.ru; tmalinskiy@yandex.ru; YKhomich@yandex.ru.

УДК 621.791

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССА СВАРКИ С СУХИМ ЛЬДОМ

А. М. МАМОНОВ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.791

MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL CALCULATION OF THE DRY ICE WELDING PROCESS

A. M. MAMONOV

Аннотация. Дан краткий анализ процесса сварки и факторов, влияющих на качество сварного соединения. Разработана и предложена математическая модель расчёта, на основе сохранения равенства подводимых и отводимых тепловых потоков в процессе сварки. Получены формулы теплового расчета процесса сварки, позволяющие определить массу, скорость и место подачи сухого льда, для снижения температурной напряженности свариваемых деталей и улучшения качества сварного соединения.

Ключевые слова: процесс сварки, сварочная ванна, тепловой поток, температура, сухой лёд.

Abstract. The article provides a brief analysis of the welding process and factors influencing the quality of the welded joint. The mathematical model of calculation on the basis of preservation of equality of heat inputs and outputs in the process of welding is developed and offered. Are received formulas of thermal calculation of process of welding, allowing to define weight, speed and a place of giving of dry ice, for decrease in temperature intensity of the welded details and improvement of quality of the welded connection.

Keywords: welding process, welding bath, heat flow, temperature, dry ice.

Сварка плавлением представляет собой комплекс физико-химических процессов, протекающих в условиях высокой температуры, при значительной концентрации тепла в небольшом объеме. В результате сосредоточенного воздействия тепла сварочной дуги плавится электродный и основной металл. Расплавленный металл электрода переходит в сварочную ванну, в основном в виде капель, величиной от тысячной доли миллиметра до нескольких миллиметров. Размер капель и их количество зависит от силы тока, химического состава электрода и его покрытия. Нагрев и плавление металла в микроскопическом объёме осуществляется практически мгновенно [1].

При этом в свариваемом металле возникают большие температурные напряжения, способствующие образованию трещин и короблению сварной конструкции. Как отмечает ряд авторов в своих работах, для ограничения внутренних деформаций весьма эффективным является охлаждение зоны

сварки [2, 3]. Для снятия указанных напряжений используется сухой лёд [4].

Процесс сварки обусловлен равенством подводимого и отводимого тепловых потоков. При электродуговой сварке подводимый тепловой поток равен электрической мощности сварочной дуги:

$$\Phi_{II} = U \cdot I, \quad (1)$$

где U – напряжение; I – сварочный ток.

Подводимый тепловой поток сварочной дуги, за вычетом потерь на излучение, локализуется в сварочной ванне, осуществляя нагрев и плавление металла:

$$\Phi_{CB} = \Phi_{II} \cdot K_{изл(CD)}, \quad (2)$$

где $K_{изл(CD)}$ – коэффициент учёта потерь теплового потока на излучение сварочной дуги в окружающую среду.

Так как процесс нагрева и плавления металла электрической дугой происходит практически одновременно, то масса металла в сварочной ванне, нагреваемая в единицу времени, равна массе расплавленного металла. Тепловой поток, поглощаемый сварочной ванной, определяется по формуле

$$\Phi_{CB} = \left[C_M \cdot (T_{ЭД} - T_1) + \lambda_M \right] \cdot \frac{dm_{св}}{dt}, \quad (3)$$

где $\frac{dm_{св}}{dt}$ – скорость изменения массы металла в сварочной ванне;

C_M – удельная теплоемкость металла; $T_{ЭД}$ – температура электрической дуги;

T_1 – температура окружающей среды; λ_M – удельная теплота плавления металла.

При сварке температура электрической дуги выше температуры плавления металла, что приводит к образованию газовой фазы над зоной расплавленного металла и его разбрызгивания. По мере удаления к периферии сварочной ванны температура понижается и на границе «жидкая – твердая» фазы температура равна температуре кристаллизации металла.

Масса металла, находящаяся в сварочной ванне в единицу времени, состоит из массы расплавленного металла свариваемых деталей и массы сварочной проволоки и определяется по формуле

$$\frac{dm_{св}}{dt} = \frac{I \cdot U \cdot K_{изл(CD)}}{C_M \cdot (T_{ЭД} - T_1) + \lambda_M}. \quad (4)$$

Масса сварочной проволоки, подаваемая в единицу времени, вычисляется по формуле

$$\frac{dm_{св}}{dt} = S_{np} \cdot \rho \cdot V_{np}, \quad (5)$$

где $\frac{dm_{св}}{dt}$ – скорость подачи массы проволоки; S_{np} – площадь поперечного сечения проволоки; ρ – плотность металла; V_{np} – скорость подачи проволоки.

Размеры сварочной ванны и время её существования зависят от способа сварки, режима сварки, физических свойств свариваемого материала, интенсивности охлаждения сварного шва. Глубина ванны равна толщине свариваемого материала, ширина – величине катета, выбираемого в зависимости от толщины свариваемого материала, а длина ванны составляет, как правило, две ширины катета.

Сварочная ванна образуется движением эллипсоида вдоль линии сварки с выбранной скоростью. Большая ось эллипса расположена в плоскости свариваемых деталей, малая ось расположена перпендикулярно сварному шву. Скорость сварки выбирается таким образом, чтобы за время существования ванны перемещение эллипсоида составило не более двух радиусов большой полуоси. Масса металла в сварочной ванне сварного шва находится по формуле

$$m_{св} = 2,33 \cdot \pi \cdot h \cdot k \cdot r_0^2 \cdot \rho, \quad (6)$$

где h – толщина свариваемых листов; k – коэффициент усиления шва; r_0 – радиус большой полуоси, равный половине сварочного катета.

Время существования сварочной ванны определяется по формуле

$$t_0 = \frac{m_{св}}{\frac{dm_{св}}{dt}}. \quad (7)$$

Скорость сварки вычисляется по формуле

$$V_{св} = \frac{2r_0}{t_0}. \quad (8)$$

Тепловой поток, локализованный в сварочной ванне, осуществляет нагрев свариваемого металла, при этом часть теплового потока теряется на разбрызгивание металла в процессе сварки и тепловое излучение сварочной ванны в окружающую среду. Тепловой поток, излучаемый сварочной ванной в окружающую среду, определяется по формуле

$$\Phi_{\text{изл}(св)} = K_{\text{изл}(св)} \cdot A_{св} \cdot (T_{\text{II}} - T_1), \quad (9)$$

где $K_{\text{изл}(св)}$ – коэффициент теплопередачи от расплавленного металла в окружающую среду; $A_{св}$ – площадь поверхности сварочной ванны; T_{II} – температура плавления металла.

Тепловой поток, нагревающий свариваемые детали, находится по формуле

$$\Phi_{CB} = U \cdot I \cdot K_{\text{изл}(CD)} \cdot K_p - K_{\text{изл}(св)} \cdot A_{св} \cdot (T_{\text{II}} - T_1), \quad (10)$$

где K_p – коэффициент разбрызгивания металла.

В процессе сварки перемещение сварочной ванны осуществляется путём плавления металла перед движущимся электродом и его кристаллизация позади электрода. По мере удаления от сварочной ванны температура металла уменьшается. Падение температуры обусловлено теплоёмкостью металла и увеличением площади поверхности теплоотдачи. Часть металла около шва является зоной термического влияния. Размеры зоны зависят от вида сварки, режима и скорости её проведения, а также от химического состава свариваемого металла. Как отмечено в [1], линейные размеры участков околошовной зоны зависят от физических свойств свариваемого металла. Чем выше теплоёмкость и чем меньше теплопроводность, тем меньше будет по размерам зона термического влияния. Увеличение силы тока увеличивает размеры зоны термического влияния. Увеличение скорости сварки уменьшает зону термического влияния [5].

Тепловой поток, за вычетом потерь на теплоизлучение и разбрызгивание металла со сварочной ванны, распространяется по свариваемому металлу.

При этом одна часть потока Φ_D поглощается теплоёмкостью свариваемого металла, нагревая его, а вторая за счет теплоотдачи поверхности рассеивается в окружающую среду:

$$\Phi_D = \Phi_M + \Phi_{\text{III}}, \quad (11)$$

где Φ_M – тепловой поток, поглощаемый теплоёмкостью свариваемого металла; Φ_{III} – тепловой поток, излучаемый в окружающую среду поверхностью свариваемого материала.

Распространение тепла в объеме свариваемого металла происходит по эксцентрическим поверхностям, равноудаленным от центра сварочной ванны. Для упрощения примем, что распространение осуществляется по кольцевым поверхностям и определяется по формулам:

$$d\Phi_{m(i)} = 2\pi r_i \cdot h \cdot dr \cdot \rho \cdot c_m \cdot dT_i; \quad (12)$$

$$d\Phi_{TP(i)} = K_{изл} \cdot 2\pi r_i \cdot dr \cdot (T_i - T_1); \quad (13)$$

$$dT_i = T_{(i-1)} - T_i, \quad (14)$$

где r_i – текущее значение радиуса; dr – заданная толщина кольца; dT_i – разность температур на входе и выходе; $T_{(i-1)}$ – предыдущая температура (вход); T_i – текущая температура (выход).

Радиус колец изменяется от 0 до r_3 , ограничиваемого размерами свариваемых деталей. Суммируя тепловые потоки $d\Phi_m$ и $d\Phi_{TP}$, интегрируя выражения (12) и (13) по поверхности свариваемых деталей, получим формулу для определения теплового потока, нагревающего свариваемые детали:

$$\Phi_D = \int_0^{r_3} 2\pi r \cdot dr \left[h \cdot \rho \cdot c_m \cdot \lambda \cdot T_i + K_{изл} \cdot (T_i - T_1) \right]. \quad (15)$$

Для увеличения теплоотдачи с поверхности сварочной ванны и поверхности свариваемых деталей используется диоксид углерода (сухой лёд). Применение сухого льда позволяет увеличить коэффициент теплоизлучения $K_{изл}$ и увеличить разность температур с $(T_i - T_1)$ до $(T_i - T_0)$. Тепловой поток, поглощаемый свариваемыми деталями с покрытием сухим льдом, определяется по формуле

$$\Phi_{D(сл)} = \int_0^{r_3} 2\pi r \cdot dr \left[h\rho \cdot c_m \cdot \lambda \cdot T_i + K_{изл(сл)} \cdot (T_i - T_0) \right], \quad (16)$$

где $K_{изл(сл)}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности, покрытой сухим льдом; T_0 – температура сухого льда.

Тепловой поток, поглощаемый сухим льдом, вычисляется по формуле

$$\Phi_{сл} = \frac{dm_{сл}}{dt_{сл}} C_{сл} \cdot (T_1 - T_0) = \Phi_{D(сл)} - \Phi_D, \quad (17)$$

где $\frac{dm_{сл}}{dt_{сл}}$ – скорость подачи массы сухого льда; $C_{сл}$ – теплоемкость сухого льда.

Для установившегося режима процесса сварки, подставляя в формулы (15) и (16) выражения из формулы (10) и делая соответствующие преобразования, получим выражение для определения распределения температуры по

поверхности свариваемых деталей, охлаждаемых воздухом и сухим льдом.

При охлаждении воздухом окружающей среды (температурой T_1) выражение для теплового расчета процесса сварки имеет вид:

$$\int_0^{r_3} 2\pi \left[h \cdot \rho \cdot c_m \cdot dT_i - K_{изл} \cdot (T_i - T_1) \right] \cdot r \cdot dr = \\ = U \cdot I \cdot K_{изл(сд)} \cdot K_p - K_{изл(св)} \cdot A_{св} \cdot (T_{II} - T_1). \quad (18)$$

При охлаждении сухим льдом (температурой T_0)

$$\int_0^{r_3} 2\pi \left[h \cdot \rho \cdot c_m \cdot dT_i + K_{изл(сл)} \cdot (T_i - T_0) \right] \cdot r \cdot dr = \\ = U \cdot I \cdot K_{изл(сд)} \cdot K_p - K_{изл(св)} \cdot A_{св} \cdot (T_{II} - T_0). \quad (19)$$

Решая уравнения (18) и (19), получим распределение температуры поверхности свариваемых деталей в зависимости от расстояния до центра сварочной ванны при охлаждении воздухом окружающей среды и при охлаждении сухим льдом.

Проведенные расчеты показывают, что применение сухого льда увеличивает интенсивность снижения температуры по мере удаления от сварного шва и уменьшает зону термического влияния.

Выводы. Разработанная математическая модель теплового расчета процесса сварки с учетом баланса тепловых потоков позволяет: оценить распределение температуры по поверхности свариваемых деталей; определить массу, скорость и место подачи сухого льда в процессе сварки для снижения температурной напряженности; провести расчет тепловых потоков в свариваемом материале; наметить пути повышения качества сварной конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник сварщика / Под ред. В. В. Степанова. – 3-е изд. – Москва: Машиностроение, 1974. – 520 с.
2. **Винокуров, В. А.** Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. **Сагалевиц, В. М.** Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В. М. Сагалевиц. – Москва: Машиностроение, 1974. – 248 с.
4. **Афшин, Х. М.** Снижение деформаций при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом тонколистовой аустенитной стали принудительным охлаждением высокотемпературной области: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / Х. М. Афшин; БНТУ. – Минск, 2012. – 182 л.
5. **Петров, Т. П.** Теория сварочных процессов / Т. П. Петров, А. С. Тумаров. – Москва: Высшая школа, 1967. – 362 с.

УДК 681.5.015

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ СБОРКИ-СВАРКИ

С. В. МЕДВЕДЕВ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 681.5.015

MAIN DIRECTIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF OBJECTS AND ASSEMBLY-WELDING PROCESSES

S. V. MEDVEDEV

Аннотация. Приведено определение цифровой трансформации в сварочном производстве, показана неизбежность этого процесса; выделены исторические этапы и показаны перспективные направления применительно к конструктивно-технологическому проектированию сварных конструкций и подготовке инженерных кадров.

Ключевые слова: сварочное производство, цифровая трансформация, этапы становления и направления развития, преимущества для конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций.

Abstract. The definition of digital transformation in welding production is given, the inevitability of this process is shown; historical stages are highlighted and promising directions are shown in relation to the structural and technological design of welded constructions and training of engineering personnel.

Keywords: welding production, digital transformation, stages of formation and directions of development, advantages for structural and technological design of welded constructions.

Автор под цифровой трансформацией понимает ряд организационных, методических и кадровых процедур создания необходимых и достаточных условий эффективного использования современных информационных, информационно-коммуникационных и вычислительных технологий для кардинального повышения качества выпускаемой продукции, производительности труда и ценности предприятий, отраслей или отдельных технологических переделов.

В силу своей интегрирующей природы процессы и технологии сборочно-сварочного производств не могут оставаться в стороне от общемировых тенденций цифровизации профессионального образования, научно-технических отраслей, а также реального сектора экономики.

Условно научно-исторический путь к глобальной цифровой трансформации

в сборочно-сварочных производствах можно разделить на несколько этапов.

Первый – назовем его условно концептуальным (конец 1950-х – нач. 1960-х гг.) – обязан своим появлением принципам конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций Н. О. Окерблома [1].

Второй этап связан с появлением, широким использованием автоматизированных рабочих мест (АРМ) на базе СМ ЭВМ и, главным образом, с появлением персональных 64-разрядных вычислительных систем, а также развитых средств трехмерного твердотельного моделирования технических объектов и систем. В этот период принципы Н. О. Окерблома развиваются и дополняются программно-методическими средствами интерактивно-алгоритмического конструирования технологически необходимой сборочно-сварочной оснастки [2].

С начала 2000-х гг. и по настоящее время формируется третий этап цифровой трансформации сборочно-сварочных производств, существенным моментом которого является масштабное использование высокопроизводительных суперкомпьютерных и грид-систем, а также облачных технологий [3–6].

Дальнейшее изложение посвящено исключительно третьему этапу, а также перспективам его развития и совершенствования.

Распределенные суперкомпьютерные вычисления и моделирование основных термодинамических процессов дуговой сварки в состоянии (по мнению автора) придать процессам технической подготовки сборочно-сварочных производств новые качества:

1) 3d-сварочная роботизированная печать превращается в одну из предпосылок построения новых компактных производств практически без каких-либо ограничений на величину производственной программы;

2) совмещение достоинств традиционных производств (механическая обработка, штамповка, литье и т. п.) с консолидирующей ролью аддитивных сварочных технологий;

3) компьютерное и суперкомпьютерное прогнозное моделирование всех этапов сборочно-сварочной инженерной деятельности;

4) offline-программирование семейства роботов с возможностями оперативной смены рабочих инструментов и технологически необходимой сборочно-сварочной оснастки;

5) гарантированное обеспечение технико-экономических преимуществ интеграции традиционной сборочно-сварочной и аддитивной технологий как отражение требований концепции ИНДУСТРИЯ 4.0;

6) возможности использования суперкомпьютерных технологий в учебном процессе профильных сварочных кафедр, а также в практической деятельности конструкторских и технологических служб машиностроительных предприятий.

Основные направления дальнейшей цифровизации объектов, процессов и организационных структур сборочно-сварочных производств представляются в следующем виде:

– единая для предприятий государств-участников Союзного государства (а в перспективе и для стран СНГ) суперкомпьютерная платформа конструктивно-технологического проектирования и моделирования объектов сборочно-сварочных производств, в которую интегрированы специализированные кафедры со своими учебными процессами, курсовым и дипломным проектированием; реализация этого направления может рассматриваться как весомая предпосылка создания Виртуального института сварки как Союзного государства, так и СНГ;

– новые формы наглядного графического представления технологической сборочно-сварочной документации, в основе которых находятся адекватные твердотельные модели деталей и технологических узлов создаваемых сварных конструкций;

– новые программно-методические средства автоматизированного конструирования технологически необходимой сборочно-сварочной оснастки с элементами искусственного интеллекта;

– построение подсистем оперативной количественной оценки существующего уровня технологичности сварных конструкций в условиях конкретного производства с возможностями выдачи рекомендаций по его повышению;

– создание суперкомпьютерных, облачных и грид-ресурсов, располагающих достаточным набором программных систем общего и специального назначения для разработки новых способов неразъемного соединения отдельных деталей, разработки новых сварочных материалов, а также совершенствования характеристик старых;

– разработки новых программ подготовки студентов-сварщиков и переподготовки специалистов сварочного производства для эффективного функционирования в условиях глобальной цифровизации;

– разработка лицензионно независимых отечественных программных систем и комплексов для потребностей сборочно-сварочных производств и адаптированных для использования на исключительно отечественных вычислительных средствах;

– весьма полезны и привлекательны (особенно для студентов сварочных специальностей) будут мобильные приложения как справочного характера, так и обеспечивающие удаленный доступ к вычислительным ресурсам суперкомпьютерных центров.

В заключительной части работы новые качества цифровизации процессов проектирования и моделирования сварных конструкций проиллюстрированы рядом практических примеров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окерблом, Н. О.** Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – Москва; Ленинград: Машиностроение, 1964. – 420 с.
2. **Медведев, С. В.** Компьютерные технологии проектирования сборочно-сварочной оснастки / С. В. Медведев. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2000. – 194 с.
3. **Медведев, С. В.** Суперкомпьютерные технологии прогнозного моделирования поведения несущих сварных конструкций при динамических нагрузках [Электронный ресурс] / С. В. Медведев, О. П. Чиж // Суперкомпьютерный форум, Переславль-Залесский, Россия, 26–29 нояб. 2019 г., ИПС РАН. – Режим доступа: http://2019.nscf.ru/Presentations/07_Supercomputernoe_modelirovanie/02_MedvedevSV.pdf. – Дата доступа: 20.12.2019.
4. **Медведев, С. В.** Основные направления разработки научно-образовательного грид-сегмента для предприятий и вузов машиностроительного профиля [Электронный ресурс] / С. В. Медведев, О. П. Чиж, В. М. Матюшенко // Суперкомпьютерный форум, Переславль-Залесский, Россия, 26–29 нояб. 2019 г., ИПС РАН. – Режим доступа: http://2019.nscf.ru/Presentations/08_Gridi/08_MedvedevSV.pdf. – Дата доступа: 20.12.2019.
5. **Медведев, С. В.** Концепция прогнозной инженерной деятельности в технической подготовке сборочно-сварочных производств / С. В. Медведев // Технические, экономические и организационные вопросы сварочного производства в Республике Беларусь: материалы Междунар. конф., Минск, 10–11 окт. 2019 г. – Минск, 2019.
6. Применение суперкомпьютерных технологий для эффективного решения задач реального сектора экономики [Электронный ресурс] / А. В. Тузиков [и др.] // XIII Цифровой форум ITSF, Казань, 29–31 мая 2019 г. – Режим доступа: <https://itsfmobile.ru/uploads/files/presentations>. – Дата доступа: 20.06.2019.

E-mail: medv@newman.bas-net.by.

УДК 681.5.015

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ
КОНСТРУКЦИЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ**

С. В. МЕДВЕДЕВ, М. В. ЖУКОВЕЦ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 681.5.015

**COMPUTER TECHNOLOGIES FOR PREDICTION OF RESIDUAL
WELDING PHENOMENA IN ARC WELDING OF GENERAL PURPOSE
CONSTRUCTIONS**

S. V. MEDVEDEV, M. V. ZUKOVEC

Аннотация. Обоснованы предпосылки разработки и требования к компьютерным (суперкомпьютерным) технологиям прогнозирования; получено практическое подтверждение выдвинутых теоретических положений; показаны направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: сварные конструкции общего назначения, компьютерные и суперкомпьютерные технологии, остаточные явления, прогнозирование, дуговая сварка.

Abstract. Development background and requirements for computer (supercomputer) forecasting technologies are substantiated. Practical confirmation of the put forward theoretical positions has been received, directions for further research are shown.

Keywords: general purpose welded constructions, computer and supercomputer technologies, residual effects, forecasting, arc welding.

Рыночные условия заставляют разработчиков сварных конструкций искать новые подходы проектирования и моделирования, способствующие повышению уровня конкурентных преимуществ.

Как правило, на большинстве машиностроительных предприятий реального сектора экономики сварные конструкции разрабатываются специалистами без базовой сварочной подготовки в универсальных графических системах; полученные при этом твердотельные модели деталей и узлов сварных конструкций передаются в расчетные системы конечно-элементного анализа, в которых на данный момент, к сожалению, особенности сварочных процессов учтены в недостаточной степени.

Цель работы – представить разработанные авторами программно-методические средства автоматизированного проектирования и моделирования сварных конструкций общего назначения, использование которых позволяет сблизить позиции разработчиков и расчетчиков с тем, чтобы конструкторские службы оперативно получили представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) конструкции после сварки, а технологическое подразделение

более глубоко проникло в состояние и проблемы напряженной сварной конструкции, находящейся под эксплуатационными нагрузками.

Анализ работ предшественников и собственный многолетний научно-методический задел позволяют в следующем виде сформулировать инженерные требования к методу и суперкомпьютерной технологии прогнозирования остаточных сварочных явлений:

– при создании трехмерной твердотельной модели сварной конструкции и указании на ней типа сварного шва программным образом в соответствии со стандартными параметрами сварочного режима для данного типа основного металла необходимо создать модели зон сплавления и термического влияния; эти модели должны автоматически интегрироваться в исходную конструкторскую модель;

– в интерактивно-алгоритмическом режиме требуется создать корректную конечно-элементную сетку с последующим расчетом на ней НДС сварной конструкции при одновременной сварке всех сварных швов в свободном состоянии в пространственном положении, наиболее пригодном для нанесения и кристаллизации сварных швов;

– конструкторское подразделение по результатам суперкомпьютерного вычислительного эксперимента должно получить укрупненное представление о величине и направлении остаточных деформаций для сравнения с закладываемыми на сборочном чертеже допусками;

– технологическая служба должна иметь возможность уточнить схему закрепления изделия в технологически необходимой сборочно-сварочной оснастке при сварке, учитывая последовательность и направления нанесения сварных швов, формируя при этом уточненное НДС конструкции, которое может существенно отличаться от НДС предыдущего этапа; к модели с уточненным НДС прикладываются внешние эксплуатационные нагрузки; полученные результаты должны анализироваться совместно конструкторской и технологической службами.

Основные научно-методические положения метода и суперкомпьютерной технологии [1–3].

1. Зона сплавления имеется во всех соединениях и может быть определена по ГОСТам или по связям с параметрами сварочных режимов (номинальные размеры при комнатной температуре).

2. Зона термического влияния (ЗТВ) имеет определенную связь с зоной сплавления; эта связь поддается аналитическому и/или эмпирическому определению.

3. Теоретически обоснованно и экспериментально подтверждено наличие в поперечном сечении стыковых швов растягивающих напряжений, достигающих предела текучести основного металла; при этом в ЗТВ напряжения в основном сжимающие, не более предела текучести.

4. Принимая во внимание упрощенные теории сварочных напряжений и деформаций, когда исследуется лишь остывание нагретой конструкции от 600 °С до комнатной температуры, рассчитываем по известным термодинамическим зависимостям эквидистантные увеличения сечений зон сплавления и ЗТВ;

механические свойства этих зон принимаются такими, какими они становятся при комнатной температуре и могут быть экспериментально верифицированы.

5. Растягивающие напряжения в поперечных сечениях швов – результат пластической необратимой деформации моделей ЗТВ, к поверхностям которых приложены напряжения, эквивалентные пределу текучести основного металла или превышающие его; модель поведения материала ЗТВ обладает упругими и пластическими свойствами, но пластические преобладают; зона сплавления имеет также комбинацию свойств, но упругие свойства преобладают.

6. Имеются различия в схемах силового нагружения пространственных замкнутых, разомкнутых и прямолинейных швов:

- в замкнутых швах нагружаются давлением, эквивалентным пределу текучести, все поверхности трехмерной модели ЗТВ;
- в разомкнутых швах нагружают все боковые и торцевые поверхности ЗТВ;
- в линейных швах нагружают все поверхности ЗТВ и торцевые поверхности зоны сплавления.

7. За счет беспрепятственной деформации упруго пластических и пластически упругих зон сплавления и термического влияния формируется в пространстве и во времени равновесное состояние сварной конструкции с остаточными деформациями и напряжениями по объему сварного шва, что, в конечном итоге, приводит к локальному повышению жесткости сварного соединения, не подвергавшегося термической обработке.

На рис. 1 и 2 показаны качественные и количественные результаты использования рассматриваемой методики компьютерного (суперкомпьютерного) моделирования остаточных сварочных явлений, которые с достаточной инженерной точностью соотносятся с аналитическими результатами по наплавке валика на кромку пластины.

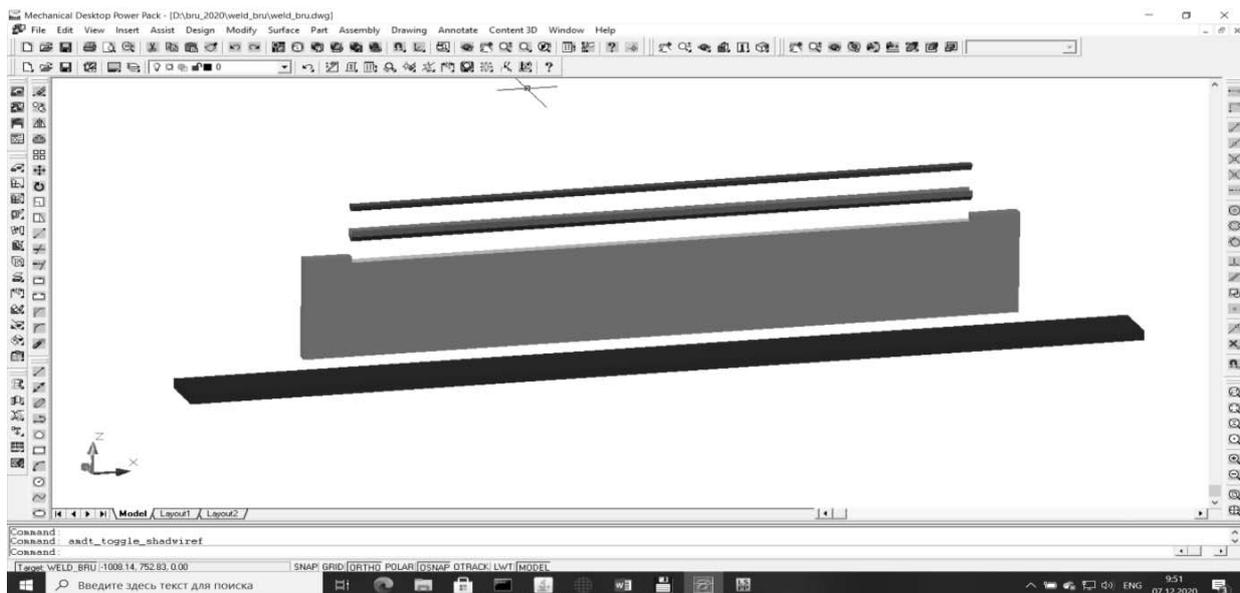
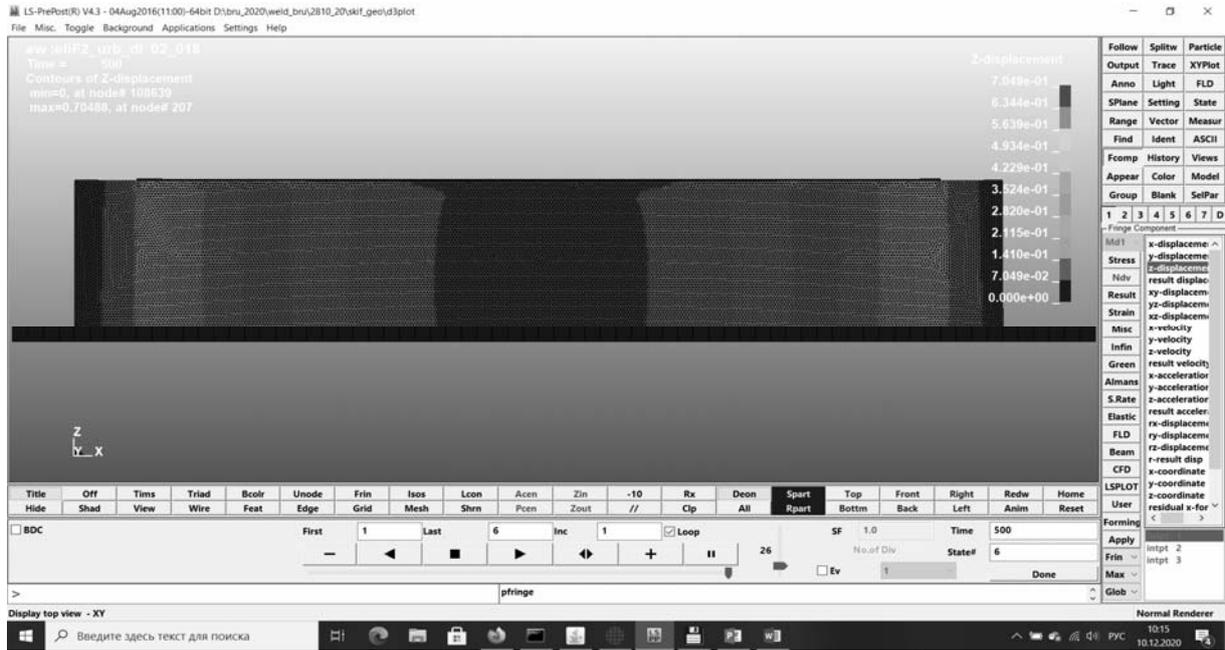


Рис. 1. Составные части твердотельной модели: зона сплавления, зона термического влияния, основной металл

a)



б)

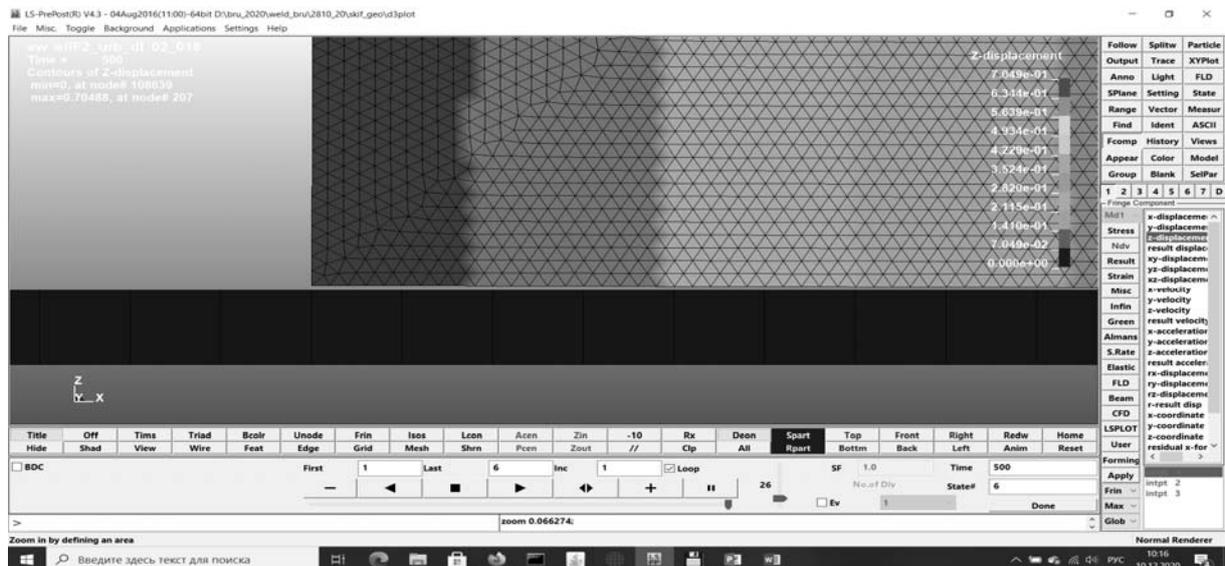


Рис. 2. Характер изменения остаточных деформаций пластины по вертикали: *a* – общий вид; *б* – деформации в районе торца пластины

Направления дальнейших исследований и разработок видятся в совершенствовании программных пользовательских интерфейсов, уточнении зависимостей геометрических размеров зон сплавления и термического влияния, переход к прогнозному моделированию остаточных явлений сварных конструкций из легированных сталей при наличии в них структурных превращений.

Рассматриваемые компьютерные технологии прогнозирования остаточных сварочных напряжений и деформаций сварных конструкций общего назначения при дуговых способах сварки могут использоваться как составная часть программно-методического обеспечения научно-образовательного грид-сегмента сборочно-сварочной направленности, разрабатываемого ОИПИ НАН Беларуси совместно со сварочными кафедрами вузов и промышленными предприятиями [4].

Авторы открыты для взаимовыгодного сотрудничества с заинтересованными структурами и отдельными специалистами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Медведев, С. В.** Компьютерное моделирование остаточных сварочных деформаций в технологическом проектировании сварных конструкций / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2001. – № 8. – С. 10–18.

2. **Medvedev, S. V.** Computer and supercomputer technologies for the design and technological design of welded structures [Electronic resource] / S. V. Medvedev, K. A. Klimov // The 4th IIW South–East European Welding Congress «Safe Welded Construction by High Quality Welding» (10–13 October 2018), Belgrade, Serbia. – Mode of access: <http://seeiiw2018.duzs.org.rs>. – Date of access: 10.11.2021.

3. **Медведев, С. В.** Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 24–29.

4. **Медведев, С. В.** Основные направления разработки научно-образовательного грид-сегмента для предприятий и вузов машиностроительного профиля [Электронный ресурс] / С. В. Медведев, О. П. Чиж, В. М. Матюшенко. – Режим доступа: <http://2019.nscf.ru/prezentacii>. – Дата доступа: 10.11.2021.

E-mail: medv@newman.bas-net.by; romannose@tut.by.

УДК 681.5.015

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ПАРАДИГМЫ ИНДУСТРИЯ 4.0

С. В. МЕДВЕДЕВ¹, М. М. КОЖЕВНИКОВ²

¹ Объединенный институт проблем информатики НАН

Минск, Беларусь

² Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
Могилев, Беларусь

UDC 681.5.015

STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL DESIGN OF WELDED CONSTRUCTIONS TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF THE INDUSTRY 4.0 PARADIGM

S. V. MEDVEDEV, M. M. KOZHEVNIKOV

Аннотация. Проанализированы основные направления развития принципов конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций в рамках реализации парадигмы ИНДУСТРИЯ 4.0. Приводятся результаты выполненных авторами исследований по созданию программно-методических средств для автоматизированного проектирования компактных сборочно-сварочных систем.

Ключевые слова: сварные конструкции, автоматизированное проектирование, прогнозное моделирование.

Abstract. Main directions of development of structural and technological design of welded constructions within the framework of the implementation of the INDUSTRY 4.0 paradigm are analyzed. The results of studies performed by the authors for the development of software and methodological tools for computer-aided design of compact assembly and welding systems are presented.

Keywords: welded constructions, computer-aided design, predictive modeling.

Промышленные предприятия, организации и учебные заведения неизбежно вступают в эпоху ИНДУСТРИЯ 4.0, где физический мир взаимодействует с виртуальным. Информационные технологии, телекоммуникации и производство сливаются, но общепринятого взгляда на данные процессы пока не существует. Авторы предлагают к обсуждению собственную позицию.

В рамках реализации парадигмы ИНДУСТРИЯ 4.0, указывающей условия глобальной цифровизации экономики, широко известные принципы конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций [1] становятся научной основой для создания высокопроизводительных сварочных производств. Результаты проведенных авторами исследований создают предпосылки формирования и эффективного использования виртуального сборочно-сварочного холдинга, воплощающего реальное компьютерное конструктивно-технологическое проектирование и суперкомпьютерное прогнозное моделирование ответственных сварных конструкций, работающих при ярко выраженных переменных нагрузках. Как видно из структурной схемы

такого холдинга, представленной на рис.1, важнейшую роль в его построении играют практические задачи компьютерного проектирования и моделирования сборочно-сварочных систем и их составных элементов. При этом широкое внедрение компьютерного проектирования в сочетании с конструктивно-технологическими методами позволит значительно повысить производительность труда и снизить затраты на разработку и производство сварных конструкций.

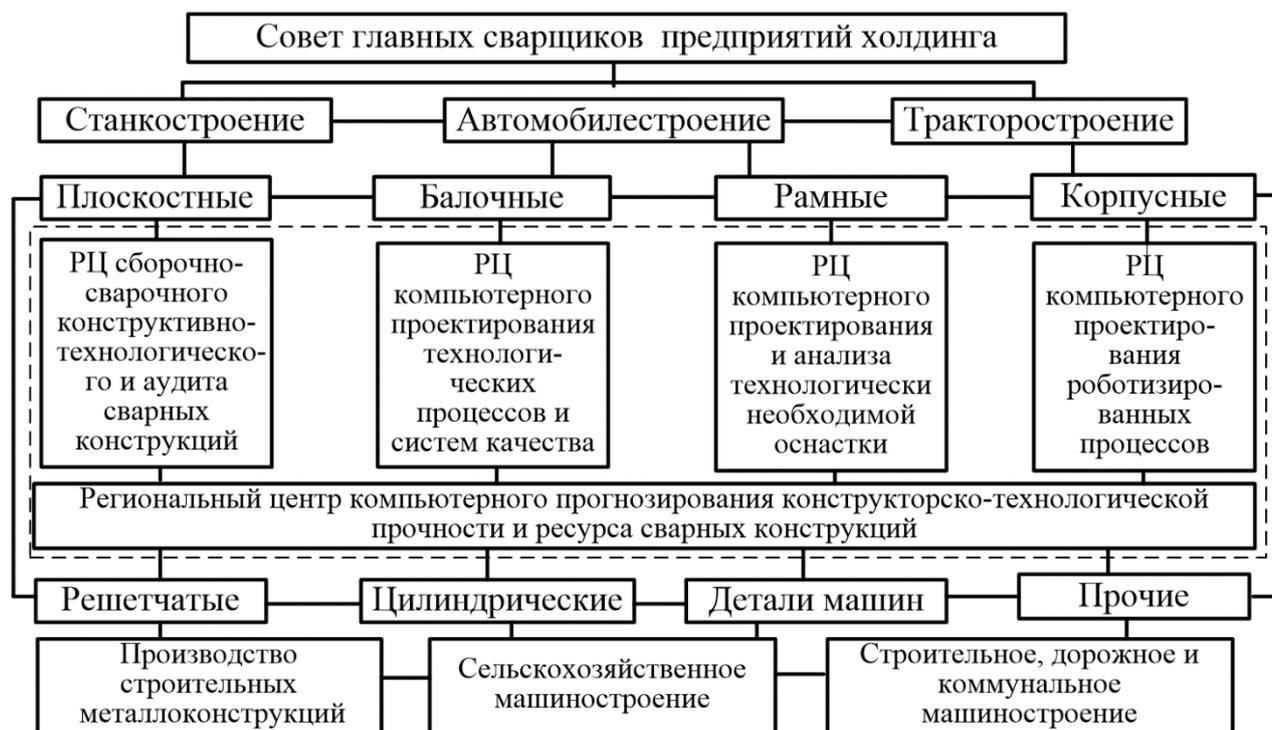


Рис. 1. Схема виртуального сборочно-сварочного холдинга

При этом одним из перспективных направлений исследований в области компьютерного проектирования сварных конструкций является разработка программно-методических средств, позволяющих моделировать основные термодинамические процессы дуговой сварки. Такие средства позволяют обеспечить решение ряда новых научно-практических задач, возникающих в процессе конструктивно-технологического проектирования. Среди таких задач можно выделить задачи разработки систем сварочной роботизированной печати на основе аддитивных технологий, прогнозное моделирование поведения сварных конструкций, автономное программирование и моделирование сборочно-сварочных роботов-манипуляторов с возможностями смены технологических инструментов и оснастки и ряд других задач [2]. Структура подобного программно-методического комплекса, построенного на основе принципов конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций приведена на рис. 2. Предлагаемый комплекс базируется на известной графической среде Inventor, развернутой на платформе грид-среды СКИФ [2].

Следует отметить, что в целом поэтапное внедрение результатов научных исследований по указанным направлениям обеспечивает интеграцию традиционных сборочно-сварочных технологий с современными аддитивными технологиями в соответствии с требованиями парадигмы ИНДУСТРИЯ 4.0. В условиях аддитивного производства сварная конструкция строится на основе цифровых трехмерных моделей с поэтапным наплавлением тонких слоев металла. Реализация такой технологии на базе компактных роботизированных сборочно-сварочных систем позволяет эффективно создавать достаточно сложные конструкции без необходимости разработки специальной оснастки и многоэтапного процесса обработки. При этом сварные конструкции могут изготавливаться по необходимости, тем самым снижаются требования к необходимым запасам деталей.

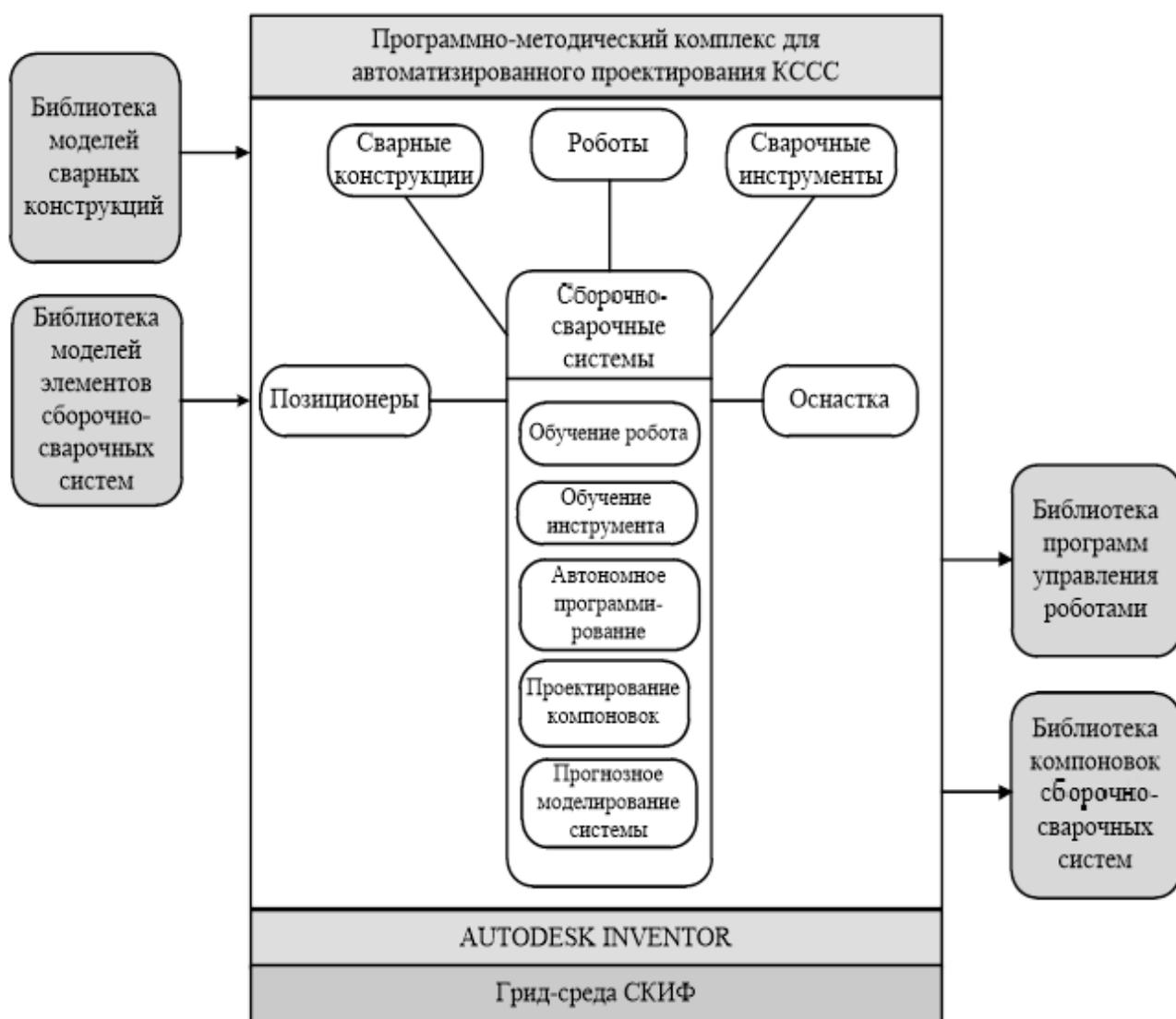


Рис. 2. Структура программно-методического комплекса конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций

Однако конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций, производимых на основе аддитивных технологий, обуславливает

ряд проблем, связанных с неравномерностью распределения температурного поля по поверхности конструкции и большими остаточными напряжениями, приводящими к ее деформации и разрушению [3, 4]. Применение компьютерных моделей для прогнозирования остаточных деформаций позволяет достаточно эффективно определить режимы сварки при аддитивном подходе, а также оптимизировать технологический процесс на стадии проектирования. При этом помимо задач компьютерного моделирования температурного поля и остаточных деформаций возникают задачи, связанные с поиском оптимального варианта перемещения сварочного инструмента при послойной наплавке [5].

В рамках конструктивно-технологического проектирования задача прогнозирования напряженно-деформированного состояния сварной конструкции обычно решается в два этапа. На первом этапе строится нестационарная модель распространения тепла по объему сварной конструкции, на втором полученные значения тепловых нагрузок применяются для численного расчета величин остаточных напряжений и соответствующих термических деформаций [6, 8, 9]. Другой подход к решению задачи прогнозирования напряженно-деформированного состояния предложен авторами работы [7]. Этот подход предполагает одновременное решение уравнений теплопроводности и деформации с применением полнокомпонентного анализа, требующего достаточно больших затрат вычислительных ресурсов по сравнению с двухэтапным методом. Однако глобальная связанная термомеханическая постановка на многослойных длинных сварных швах при реализации вызывает очень серьезные вычислительные трудности. Поэтому в [3, 4] предложены алгоритмы компьютерного моделирования остаточных сварочных деформаций, позволяющие существенно снизить вычислительные затраты и ориентированные на проектирование сварных конструкций на базе развертывания в грид-среде СКИФ.

В рамках конструктивно-технологического подхода к проектированию сварных конструкций, получаемых в ходе аддитивного процесса, параметры напряженно-деформированного состояния позволяют определить критерии качества для следующих оптимизационных задач: поиска рационального порядка наложения слоев наплавки, поиска рационального направления движения сварочного инструмента при наплавлении, поиска мест закрепления сварной конструкции, поиска рационального положения сварной конструкции в пространстве при наплавке, поиска порядка нанесения прихваток и вспомогательных швов, сформулировать критерии беспрепятственного извлечения конструкции после остывания. В работе предлагаются следующие критерии оптимизации, формализующие технологические требования к напряженно-деформированному состоянию сварной конструкции на основе параметров конечно-элементной модели. Минимум деформаций, либо выход на допустимые деформации:

$$\left(\Delta_{ijk}^n - \Delta_{ijk}^d\right) \rightarrow \min ; \quad (1)$$

$$\left(\max\left(\Delta_{ijk}^n - \Delta_{ijk}^d\right) - \Delta\right) \rightarrow \min , \quad (2)$$

где Δ – предельно допустимое по условиям технологии значение деформации сварной конструкции; $\left(\Delta_{ijk}^n - \Delta_{ijk}^d\right)$ – линейное изменение размеров конструкции вдоль осей координат x, y, z .

Допустимый уровень остаточных напряжений

$$\left(\max\left(\sigma_{ijk}^d\right) - \sigma\right) \rightarrow \min . \quad (3)$$

Равномерность распределения температурного поля по высоте и длине сварной конструкции:

$$\left(T_{ijk} - T_{i+1jk}\right) - T \rightarrow \min ; \quad \left(T_{ijk} - T_{ij+1k}\right) - T \rightarrow \min ; \quad \left(T_{ijk} - T_{ijk+1}\right) - T \rightarrow \min , \quad (4)$$

где T – предельно допустимое значение перепада температуры.

В общем виде модель траектории сварочного инструмента с определенным направлением перемещения за некоторое время t может быть определена как последовательность дискретных точек в пространстве $S = \{\mathbf{x}_n\}$. Соответственно, на сварной конструкции может быть определена последовательность слоев наплавки $S_n(S)$. Проведенный анализ показал, что последовательности \mathbf{x}_n и S_n определяют как форму температурного поля, так и предельные значения напряжений и соответствующих деформаций сварной конструкции. В наиболее общем виде модель может быть представлена как

$$\frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} = f_1(S_n, \mathbf{x}_n, t); \quad \frac{\partial \Delta}{\partial \mathbf{x}} = f_2(S_n, \mathbf{x}_n, t); \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{x}} = f_3(S_n, \mathbf{x}_n, t). \quad (5)$$

Тогда задача поиска рационального порядка наложения слоев и направления их наплавки может быть сформулирована следующим образом. Определить последовательность наложения слоев S_n заданных последовательностями \mathbf{x}_n из допустимого множества, на которой минимизируются критерии (1)–(4), если задана модель напряженно-деформированного состояния (5). Аналогичная задача может быть сформулирована для поиска порядка нанесения прихваток, вспомогательных швов и мест закрепления сварной конструкции.

При построении модели напряженно-деформированного состояния (5) использовался следующий подход, основанный на работах [4, 8, 9] и применении средств суперкомпьютерного моделирования. Как указывалось ранее, подобная модель предполагает решение краевой задачи теплопроводности и расчета напряженно-деформированного состояния сварной конструкции. Решение первой задачи позволяет определить поле температур $T(\mathbf{x}, t)$ в некоторой ограниченной области V_k на основе уравнения теплопроводности. При этом

объем сварной конструкции изменяется динамически по мере проведения наплавки с течением времени:

$$V_k = V_k^{old} + V_k^{new},$$

где V_k^{old} – объем металла, наплавленный в предыдущий момент времени, $V_k^{old} = V_{k-1}$; V_k^{new} – объем металла, наплавленный в текущий момент времени.

Краевая задача определения деформированного состояния сварной конструкции решается с использованием суперкомпьютерных средств на основе уравнения равновесия вида $div \hat{\sigma} = 0$, $x \in V_k$, где $\hat{\sigma}$ – тензор напряжений.

Отметим в заключении, что существенным преимуществом предлагаемого подхода является то, что он фактически интегрирует как традиционные сборочно-сварочные технологии, так и прогрессивные аддитивные, реализуя процесс конструктивно-технологического проектирования на базе средств суперкомпьютерного прогнозного моделирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окерблом, Н. О.** Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – Москва; Ленинград: Машиностроение, 1964. – 420 с.
2. **Медведев, С. В.** Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 24–29.
3. **Медведев, С. В.** Компьютерное моделирование остаточных сварочных деформаций в технологическом проектировании сварных конструкций / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2001. – № 8. – С. 10–18.
4. **Medvedev, S. V.** Computer modeling of residual welding strains in technological design of welded structures / S. V. Medvedev // Welding International. – 2002. – № 16 (1). – P. 59–65.
5. Additive Manufacturing of High-performance Metals and Alloys. Modeling and Optimization / D. Trushnikov [et al.]; ed. by I. Shishkovsky. – London: InTech, 2018. – 154 p.
6. **Labudovic, M.** A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping / M. Labudovic, D. Hu, R. Kovacevic // Journal of Materials Science. – 2003. – Vol. 38, № 1. – P. 35–49.
7. Linking process, structure, property, and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support / J. Smith [et al.] // Computational Mechanics. – 2016. – № 57 (4). – P. 583–610.
8. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволоочных материалов на формирование остаточных деформаций / О. Ю. Сметанников [и др.] // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 181–194.
9. Modeling of heat and mass transfer for wire-based additive manufacturing using electric arc and concentrated sources of energy / D. Trushnikov [et al.] // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – № 7. – P. 741–747.

E-mail: medv@newman.bas-net.by; kmmk@mail.ru.

УДК 621.791

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ 304L/P265GH

*Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, Т. И. БЕНДИК, В. А. СИДОРОВ, В. Ю. СЕРЕДА,
А. А. ЛИТВИНКО*

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

UDC 621.791

WELDING TECHNOLOGY OF THE BIMETALLIC PIPES 304L/P265GH

*F. I. PANTELEYENKO, T. I. BENDIK, V. A. SIDOROV, V. Y. SEREDA,
A. A. LITVINKO*

Аннотация. Исследование структуры металла шва и зоны термического влияния переходного и плакирующего слоев сварного соединения труб из биметалла 304L/P265GH.

Ключевые слова: сварка биметаллов, плакирующий слой, переходный слой, металл шва.

Abstract. A study was made of the weld metal and heat-affected zone structure of the transition and cladding layers of the welded joint of bimetal pipes 304L/P265GH.

Keywords: welding of bimetals, cladding layer, transition layer, weld metal.

В настоящее время в производстве различных технических устройств все большее применение находят биметаллические материалы. С развитием техники растет необходимость создания материалов, обладающих комплексом свойств, таких как высокая прочность, коррозионная стойкость, износостойкость, теплопроводность и др. Такие материалы могут быть изготовлены с помощью соединения разнородных металлов в монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей технологической обработке и в условиях эксплуатации.

Наиболее распространены биметаллы с плакирующим слоем с высокими показателями коррозионной стойкости.

При сварке плакированной стали (основной слой – низкоуглеродистая сталь перлитного класса, плакирующий слой – коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса) необходимо учитывать ряд металлургических особенностей. При сварке плакирующего слоя происходит перемешивание аустенитного металла с металлом основного слоя из низкоуглеродистой стали. Если в качестве присадочного металла используется недостаточно высоколегированный сварочный материал, в сварном соединении на линии сплавления могут частично или полностью формироваться мартенситные структуры. Шов получается недопустимо твердым и имеет в дальнейшем тенденцию к образованию трещин.

Для сварки высоколегированной стали с низкоуглеродистой или низколегированной сталями обычно рекомендуется использовать более высокоаустенитный присадочный материал, чем основной металл нержавеющей стали. Наиболее часто применяются сварочные материалы следующего

химического состава (в весовых %): (23...25) % Cr + (11...15) % Ni (с Mo или без него), 29 % Cr + 9 % Ni и 18 % Cr + 8 % Ni + 6 % Mn [1].

В табл. 1 приведены сведения о стыковых сварных соединениях, выполненных для проведения исследований.

Табл. 1. Сварные соединения

Способ сварки	Положение при сварке	Размер свариваемых деталей, мм	Основной металл	ТНПА на сварное соединение
141 + 111	РС	63,5 × 6,53	Биметалл 304L/ P265GH	СТБ ISO 9692-4-2013 п. 3.3
141 + 111	РН	63,5 × 6,53	Биметалл 304L/ P265GH	СТБ ISO 9692-4-2013 п. 3.3

В исследуемой технологии сварки применяются следующие сварочные материалы, согласно рекомендациям производителя биметаллических труб:

– сварка основного слоя (141-й способ): прутки ОК Tigrod 13.09 W 46 2 W2Mo EN ISO 636-A (табл. 2);

– сварка плакирующего слоя 304L (111-й способ): электроды ОК 67.60 E 23 12 LR 3 2 EN ISO 3581-A (табл. 3).

Табл. 2. Химический состав ОК Tigrod 13.09

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Cu, %	V, %	Al, %	Ti + Zr, %
0,09	0,54	1,03	0,017	0,011	0,04	0,03	0,44	0,07	<0,01	<0,01	<0,01

Табл. 3. Химический состав ОК Tigrod 67.60

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Cu, %	N, %
0,02	0,75	0,7	0,023	0,01	23,6	12,8	0,01	0,02	0,11

С учетом рекомендаций [2, прил. А] максимально возможную долю перемешивания металлов для ручной дуговой сварки принимаем 30 %. Для определения химического состава наплавленного металла при сварке плакирующего слоя (рис. 1, т2) и основного слоя из низкоуглеродистой стали (см. рис. 1, т1) построена диаграмма Шеффлера (см. рис. 1). Точка 3 (см. рис.1) иллюстрирует структуру наплавленного металла плакирующего слоя (аустенит + 5 % феррита). Как видно из теоретических исследований, при указанной выше доле перемешивания металла структура плакирующего шва благоприятная.

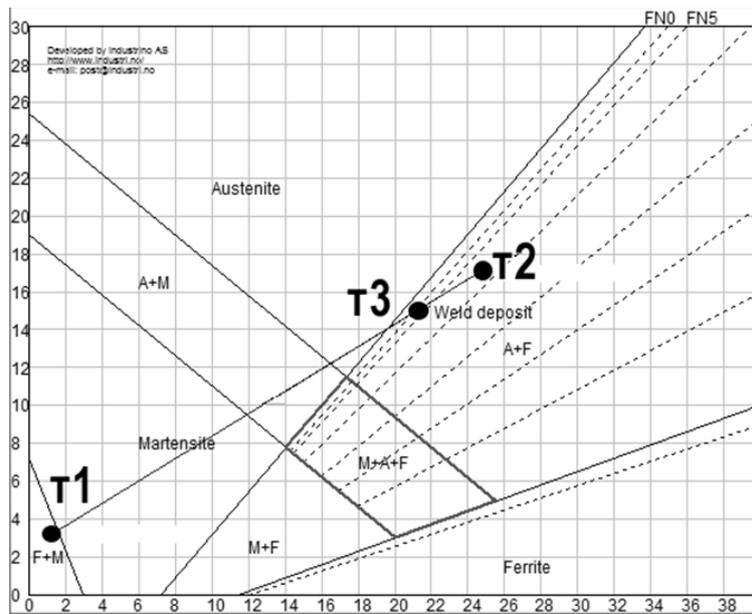


Рис. 1. Диаграмма Шеффлера для определения химического состава наплавленного металла при сварке плакирующего нержавеющей слоя (304L) с низкоуглеродистым слоем

Сварка выполнялась комбинированным способом. Основной слой (рис. 3, проходы 1 и 2) выполнялся 141-м способом на постоянном токе прямой полярности с использованием присадочной проволоки марки ОК Tigrod 13.09, а проходы, восстанавливающие слой плакировки из нержавеющей стали (см. рис. 3, проходы 3–5) – 111-м способом на постоянном токе обратной полярности электродами ОК 67.60 (ESAB) диаметром 2,5 мм. Сварочный ток составлял 70...100 А при аргоно-дуговой сварке и 55...70 А – при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами производилась узкими ниточными валиками с минимальным тепловложением для предотвращения перемешивания аустенитного металла с металлом основного слоя из низкоуглеродистой стали. Разделка кромок и порядок наложения слоев представлена на рис. 2 и 3.

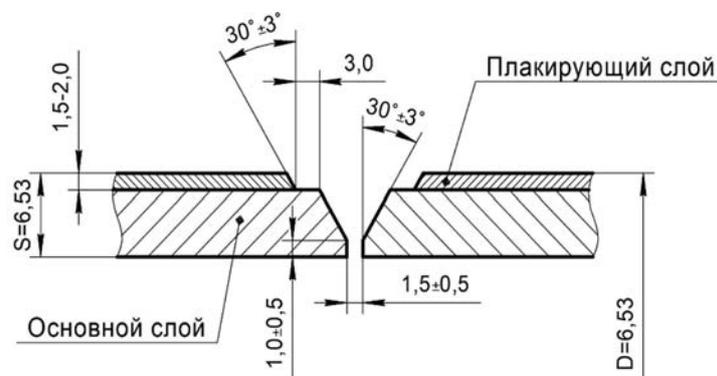


Рис. 2. Конструктивные элементы подготовки кромок

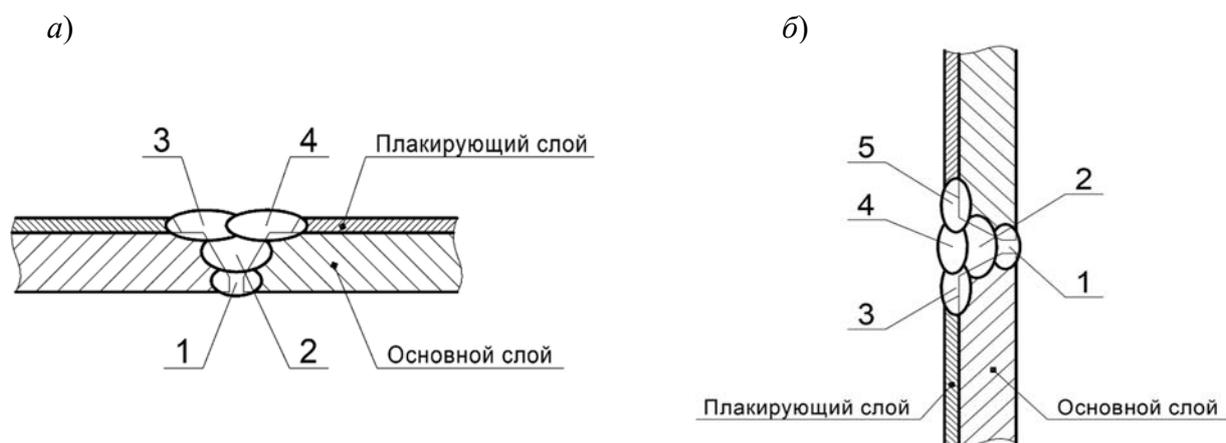


Рис. 3. Последовательность выполнения проходов при сварке вертикального (*а*) и горизонтального (*б*) стыков труб

Исследование микроструктуры производилось в соответствии с СТБ ЕН 1321–2004 [3] на микроскопе МИ-1 с ПО SIAMS 800 при увеличениях $500\times$ и $1000\times$. Травление поверхности микрошлифов производилось в соответствии с табл. 4. На рис. 4 представлена структура металла шва плакирующего слоя.

Табл. 4. Параметры травления микрошлифов

Состав реактива	Способ травления	Класс материала
4-процентный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Погружной	Перлитный
0,5 мл концентрированной азотной кислоты + 30 мл концентрированной соляной кислоты + 70 мл уксусной кислоты	Погружной	Аустенитный

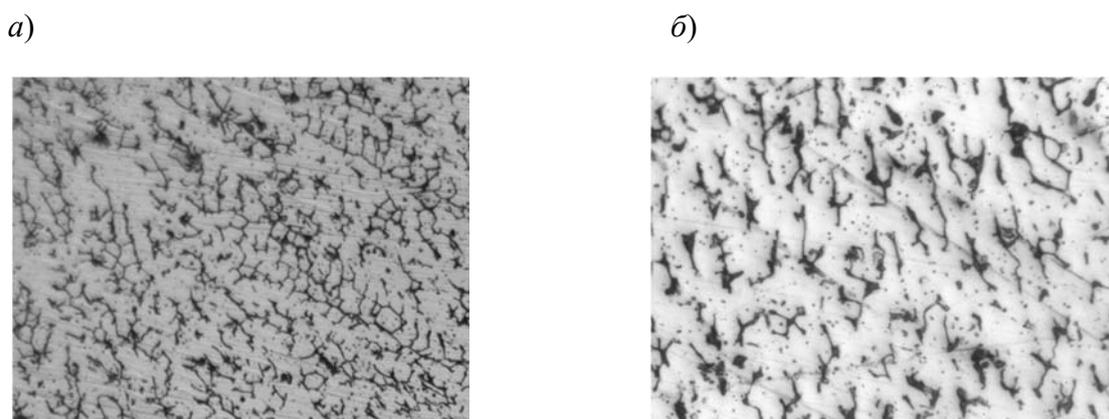


Рис. 4. Микроструктура металла шва плакирующего слоя (аустенит, α -фаза и карбиды TiC) проходы 3–5 при увеличении: *а* – $500\times$; *б* – $1000\times$

Микроструктура переходной зоны плакирующего и основного слоев представлена на рис. 5. Зона сплавления разнородных сталей в состоянии после сварки отличается наличием переходного слоя небольшой ширины, отличающегося от структуры остальных участков. Можно предположить,

что в зоне сплавления произошло науглероживание в наплавке у линии сплавления и обезуглероживание основного слоя, а аустенитные зерна ориентированы в направлении теплоотвода [4].

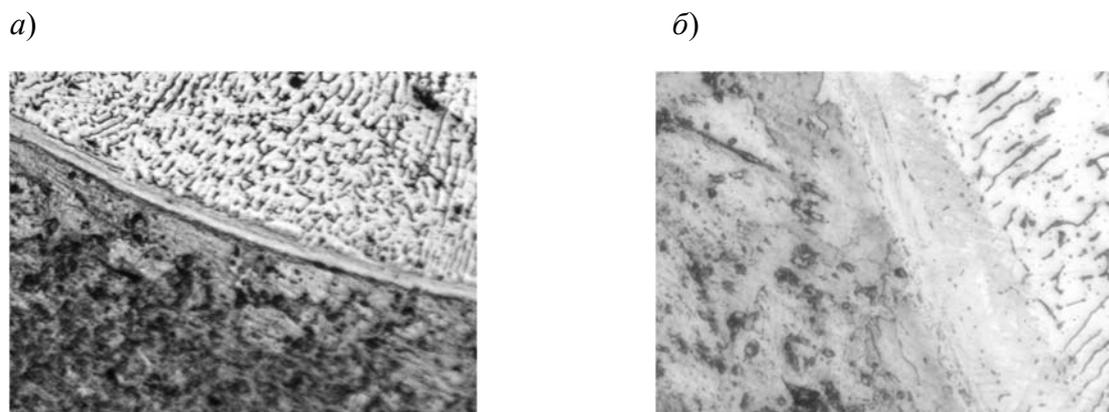


Рис. 5. Микроструктура металла в переходной зоне при сварке основного и плакирующего слоев биметалла при увеличении: *a* – 500×; *б* – 1000×

С целью оценки твердости прослойки в сварных соединениях разнородных сталей произведены дополнительные измерения микротвердости на линии сплавления основного и плакирующего слоев сварных соединений из биметалла. Схема и результаты измерений представлены на рис. 6, табл. 5 и 6.



Рис. 6. Схема измерения микротвердости

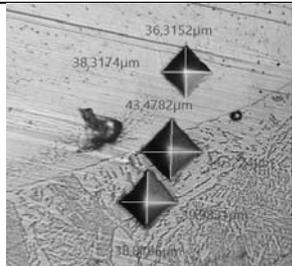
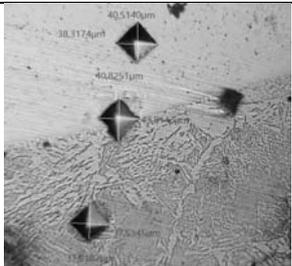
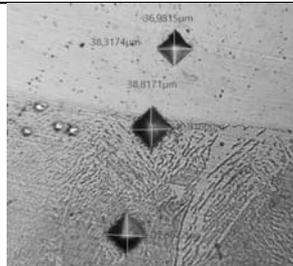
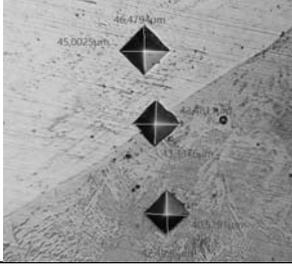
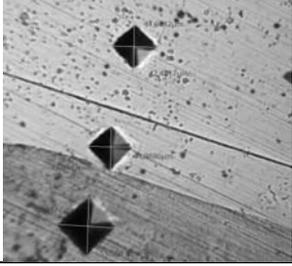
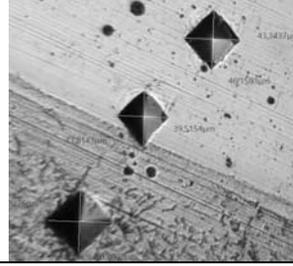
Табл. 5. Результаты измерения микротвердости

Маркировка образца	Номер точки	Первая диагональ отпечатка, мкм	Вторая диагональ отпечатка, мкм	Микротвердость HV _{0,2} , МПа
1	2	3	4	5
1	1	36,3	38,3	2756
	2	43,5	44,3	1989
	3	38,8	39,9	2476
	4	40,5	38,3	2470
	5	40,8	43,8	2143
	6	37,5	37,5	2726
	7	37,0	38,3	2705
	8	38,9	40,8	2414
	9	37,9	41,3	2445

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5
2	1	46,5	45,0	1828
	2	43,5	43,3	2035
	3	40,5	42,5	2226
	4	44,7	42,5	2017
	5	45,0	43,8	1945
	6	58,2	55,0	1197
	7	43,3	46,2	1915
	8	39,5	43,8	2210
	9	48,3	50,0	1587

Табл. 6. Фотографии точек измерения микротвердости при увеличении 500×

Маркировка образца	Номер точек 1–3	Номер точек 4–6	Номер точек 7–9
1			
2			

Проведенные исследования показали, что предложенная технология сварки труб из биметалла 304L/P265GH обеспечивает получение сварных соединений с благоприятной микроструктурой и микротвердостью в зоне переходного слоя сварного соединения разнородных сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по сварке разнородных металлов ESAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.uniprofit.ru/spravka/catalogi/m.pdf>. – Дата доступа: 20.07.2022.
2. СТБ EN 1011-5-2009. Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Ч. 5: Сварка плакированной стали. – Введ. 2010-01-01. – Минск: Госстандарт, 2009. – 20 с.
3. СТБ EN 1321-2004. Испытания макроскопические и микроскопические металла сварного соединения. – Введ. 2010-01-01. – Минск: Госстандарт, 2004. – 12 с.
4. Готальский, Ю. Н. Сварка разнородных сталей / Ю. Н. Готальский. – Киев : Техніка, 1981. – 184 с.

E-mail: bntu.weld@gmail.com; benedikt082@gmail.com.

УДК 666.76:621.762.4

ТЕХНИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА (ТК): ПРОБЛЕМЫ, ПРИНЦИПЫ И МЕХАНИЗМЫ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОФИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ-ИЗДЕЛИЙ

**Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО¹, В. И. БОРОДАВКО², А. М. МАМОНОВ¹,
Н. А. ШМУРАДКО¹, В. Т. ШМУРАДКО¹**

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «НПО Центр», НАН Беларуси

Минск, Беларусь

UDC 666.76:621.762.4

TECHNICAL CERAMICS (TC): PROBLEMS, PRINCIPLES AND MECHANISMS OF SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF SPECIFIC ELECTRICAL MATERIALS-PRODUCTS IN PRODUCTION

**F. I. PANTELEENKO, V. I. BORODAVKO, A. M. MAMONOV,
N. A. SHMURADKO, V. T. SHMURADKO**

Аннотация. С позиции выполненных и реализованных *НИР-НИОТР* в области *технической керамики* проведен принципиально объективный анализ создания и применения *ТК* в различных научно-технических областях и отраслях промышленности. Сформированы *концепция* и *методология создания ТК* профильного научно-технического назначения, обеспечивающие логистические принципы *разработки физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии – проведения эффективного и объективного структурирования профильных материаловедческо-технологических объектов (МТО)* (материалов – технологий – изделий – производств) конструкционного, функционального, электротехнического, керамоогнеупорного и другого назначения. Разработанные инновационные *МТО* (конструкционного, функционального, керамоогнеупорного, электротехнического и другого назначения) на основе *оксидных и бескислородных химических соединений (рис. 1) прошли лабораторные и производственные испытания, качественное тестирование и реализацию на предприятиях РБ и РФ.*

Ключевые слова: проблема, техническая керамика (ТК), НИР, НИОТР, методология, логистика, принципы, алгоритмы исследования, концепция, физико-химические процессы, механизмы, структурная инженерия, структурирование, состав, структура, свойство, материал, технология, изделие, производство.

Abstract. From the standpoint of research and development in the field of technical ceramics, a principled and objective analysis of TC creation and application in various scientific and technical fields and industries has been carried out and implemented. The concept and methodology of creating TC for scientific and technological purposes have been formed that ensure logistics principles of development of physical and chemical processes and structural engineering mechanisms for effective and objective structuring of specialized material science and technology objects (materials, technologies, products, manufactures) for structural, functional, electrical, ceramic and fireproof purposes. The developed innovative MTO (structural, functional, ceramic and fire-resistant, electrical and other purposes) on the basis of oxide and oxygen-free chemical compounds passed laboratory and production tests, quality testing and implementation at the enterprises of Belarus and Russia.

Keywords: problem, technical ceramics (TC), R&D, NIOTR, methodology, logistics, principles, research algorithms, concept, physical and chemical processes, mechanisms, structural engineering, structuring, composition, structure, property, material, technology, product, production.

Решение проблемных задач в научно-исследовательских и технических областях *тесно взаимосвязано с материаловедческо-технологическими разработками в области технической керамики*. Так, *техническая керамика, занимающая пока третье место в мире по научно-практической востребованности после металлов и полимеров, сегодня эффективно обеспечивает новыми конструкционными, функциональными, керамоогнеупорными, электроизоляционными и другими профильными материалами-изделиями практически все промышленные отрасли*.

Для *оперативного определения, анализа и решения основных и второстепенных научно-исследовательских, технических, технологических и производственных проблем, а также вытекающих из них целей и задач исследования разрабатывается концепция и методология создания профильных, например, электротехнических материалов-изделий из ТК* (рис. 2, № 1–6).

Профильная методология включает комплексные материаловедческо-технологические (химические, физико-химические, физико-математические) логистические модели и блок-схемы разработки и реализации *физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии – структурирования, например, конструкционных электротехнических материалов-изделий, дисперсно-упрочненных оксикарбоборнитридными соединениями, концептуальные принципы создания – реализации которых состоят в следующем*.

Используя информационные системы и технологии как инструмент и средство базового информационно-аналитического обеспечения проводимых НИР-НИОТР на всех этапах их разработки, созданную методологию материаловедческо-технологической разработки – реализации системно-дифференцированной программно-методологической формулы «состав – структура – свойство» – «термо-коррозионно-эрозионно-стойкий электротехнический материал» – «механизмы эксплуатационного термического, химического, электротехнического и другого разрушения» как логистический источник стратегии и тактики экспериментально-аналитического исследования, разработанные физико-химические процессы и механизмы структурной инженерии как концептуально-методологические принципиальные схемы управления иерархией структурных и энергетических уровней создаваемых профильных материалов-изделий, фазовые диаграммы состояния и их анализ как прикладной информационно-аналитический источник прогнозирования физико-химических и структурно-фазовых составов и текущих структурных состояний проектируемых (создаваемых) материалов-изделий и представляющих логистический инструмент аналитической разработки температурно-временных диаграмм тепловой обработки и спекания разрабатываемых (профильных) керамических материалов, компьютерное моделирование как оперативное средство анализа, прогнозирования, проектирования и расчета материаловедческо-технологических режимов получения состава, структуры и свойств создаваемых материалов-изделий, возможно обеспечить разработку и реализацию материаловедческо-

технологических основ физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии – структурирования разнопрофильных материалов-изделий из ТК на уровне инновационных производств.

Эффективной *информационно-аналитической, методологической и концептуальной системно-дифференцированной базой в разработке, исследовании, создании и реализации (РИСП) инновационных материаловедческо-технологических объектов из технической керамики (МТО – ТК) различного (профильного) научно-практического назначения является современное неорганическое – керамическое – материаловедение*, которое комплексно позволяет создавать концептуально-методологические *платформы РИСП МТО из ТК*, формировать *информационно-аналитические карты научно-технического уровня (ИАКНТУ) на МТО*, а на их основе создавать *профильные производства.*

Разработка, исследование, создание конкретных материалов на уровне *НИР-НИОТР* формируется и реализуется с позиции *материаловедческо-технологической концепции*, включающей системно-дифференцированные программно-методологические блок-схемы и алгоритмы их решения на уровнях «состав – структура – свойство» – «электротехнический материал» – «технология» – «материал – изделие» – «физико-химические процессы и механизмы *синтеза-разрушения* структурных уровней» – «*оптимизация* структурных параметров и свойств» – «*эксплуатационная надежность – долговечность* и эффективность изделий» – *создание инновационных производств материалов-изделий из ТК.*

Разработанные инновационные МТО прошли испытания и *реализацию на следующих предприятиях: РБ –* ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК», г. Жлобин – *износостойкие керамические поддерживающие ролики* для производства металлокорда и проволоки катанки; *двухслойные* корундо-диоксидциркониевые *стаканы-дозаторы (СД)* для промковшей МНЛЗ; ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси – *огнеупорные воронки и литниковые системы* для дозирования в центрифугу алюминиевых сплавов, нержавеющей стали и чугунов; ОАО «Атлант», г. Минск – *электроизоляторы* для автоматической контактной сварки биметаллических трубчатых элементов; УЗ «Стоматологические поликлиники» МЗ РБ – *термо-коррозионно-эрозионно-стойкие тигли* для индукционных плавильно-литьевых установок в стоматологии и др.; **РФ –** НПП «Изумруд», г. Санкт-Петербург – *капиллярно-проницаемые диафрагмы (КПД) без и с тонкопленочными (ионно-дуговыми (плазменными) и магнетронными) функциональными покрытиями для электрохимических реакторов (ЭХР) энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в физико-химические реагенты* бытового, сельскохозяйственного, медицинского (антибактериального, противовирусного) и другого назначения; АО «Гормаш», г. Белгород – *высокотемпературные вакуумплотные электроизоляторы* для вакуумных печей газотермического упрочнения (1050 °С × 10,5 ч) бурового инструмента в среде диссоциированного ацетилена; АО ОКБ «Факел», г. Калининград – *высокоэнергоемкие топливные электроды (термоэммиттеры) для плазменных ракетных двигателей (ПРД)* (см. рис. 2).

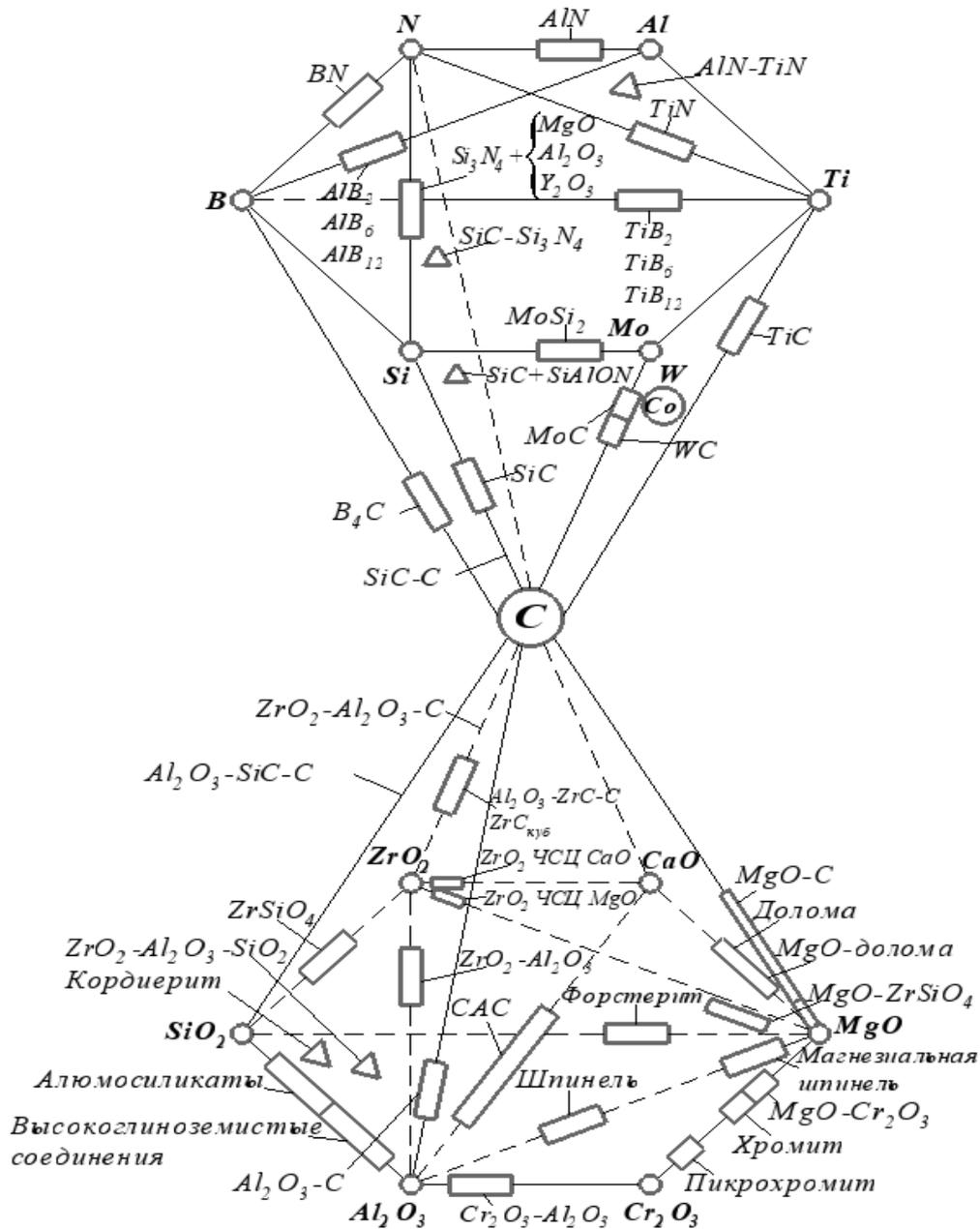


Рис. 1. Аналитическая системно-дифференцированная логистическая блок-схема направленного создания базовых конструкционных, функциональных, электроизоляционных, керамоогнеупорных и других профильных материалов-изделий из технической керамики на основе техногенного минерального сырья – кислородосодержащих (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO , TiO_2 , BaO , B_2O_3 , ZrO_2 , ZrO_2 ЧЩ), бескислородных (карбидных, боридных, нитридных – SiC , B_4C , BN , AlN , TiN , TiB_2 , TiB_6 , AlB_2 , AlB_6 , LaB_2) и других химических соединений для различных профильных технологических областей и отраслей промышленности: С – углерод; В – бор; N – азот; К – кордиерит ($2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$); СА₂–СА – высокоглиноземистый цемент ($\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)

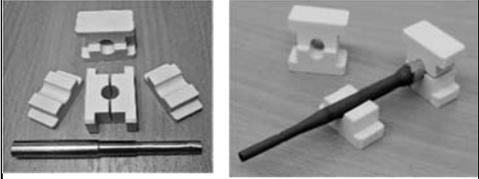
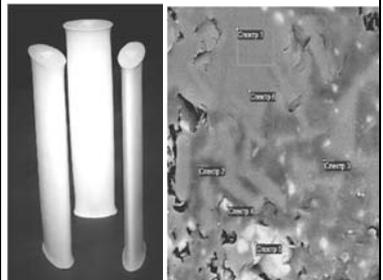
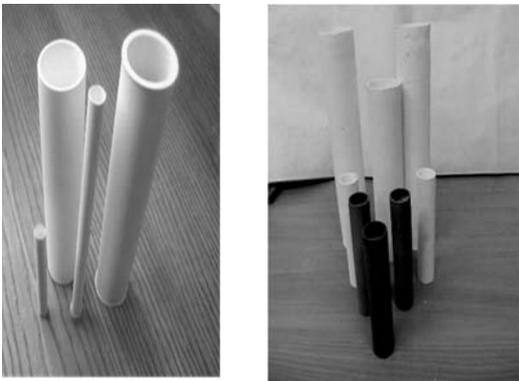
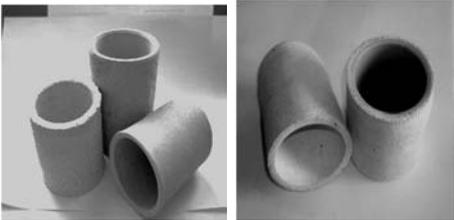
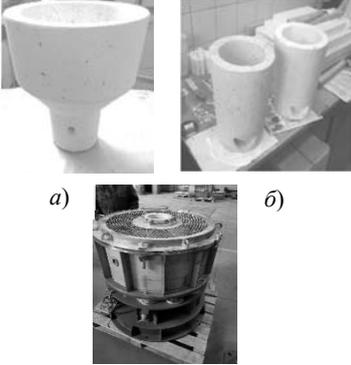
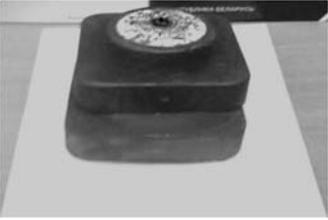
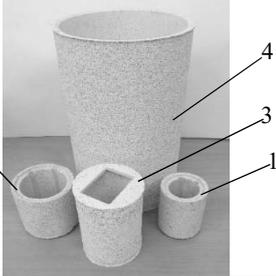
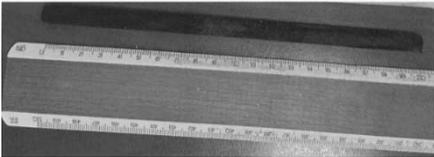
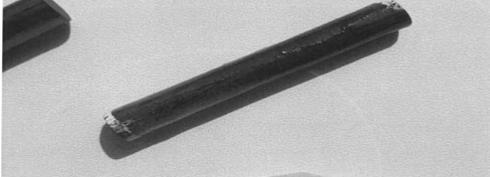
<p>1. Электроизоляторы; назначение – автоматическая сварка трубчатых биметаллических элементов (а, б)</p>  <p>a) б)</p>	<p>2. Термостойкие электроизоляторы (а), структура (б); назначение – работа в тормозных электротрансмиссиях УВТР 2 × 750 к/с БелАЗ</p>  <p>a) б)</p>	<p>3. Электроизолятор; назначение – работа в электронно-лучевой пушке ЭЛА 30/60 в режиме вакуумной сварки толстостенных (50...150 мм) конструкций из алюминиевых сплавов</p> 
<p>4. Огнеупорные (1200 °С) тепло- и электроизоляционные материалы-изделия из термовспученного вермикулита (ТВВ)</p> 	<p>5. Высокотемпературные электроизоляторы (а) для вакуумных печей (б) (фирма Ipson, Германия) газотермического упрочнения (1050 °С × 10,5 ч) бурового инструмента (с массой загрузки 2 т) в среде диссоциированного ацетилена</p>  <p>a) б)</p>	
 <p>a) б)</p>  <p>в) г)</p>	<p>6. Установки «Изумруд» (а) и «АКВАЭХА» (б) для энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в функциональные реагенты в ЭХР при помощи КПД (НПП «Изумруд», г. Санкт-Петербург)</p> <p>Пористые капиллярно-проницаемые диафрагмы (КПД) для электрохимических реакторов (ЭХР) энергетической обработки и структурирования воды и водных растворов в физико-химические реагенты бытового, сельскохозяйственного, антимикробного, антибактериального и другого назначения (в, г) – КПД <i>без</i> и <i>с</i> функциональными тонкопленочными (ионно-плазменными, магнетронными) покрытиями, активирующими электрохимические процессы и механизмы структурирования различных химических реагентов</p>	

Рис. 2. Материалы-изделия (МТО) из технической керамики

<p>7. Износостойкие поддерживающие ролики (а) для производства металлокорда и проволоки катанки (б); ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК», г. Жлобин</p>  <p>а) б)</p>	<p>8. Износостойкие (триботехнические) уплотнительные элементы для высокооборотистого оборудования холодильных установок</p> 	<p>9. Абразивно-износостойкие дюзы для римеров подземной проходки грунтов с последующим бетонированием каналов</p> 
<p>10. Тигли огнеупорные, одно- и двухслойные; назначение – работа в плавильно-литьевом оборудовании с расплавами углеродистых черных, цветных и нержавеющей сталей и сплавов</p> 	<p>11. Огнеупорные термокоррозионно-эрозийно-стойкие плавильно-литьевые тигли для производства зубных протезов в стоматологии</p> 	<p>12. Огнеупорные термокоррозионно-эрозийно-стойкие воронки для дозирования алюминиевых сплавов (а), черных и нержавеющей сталей и сплавов, чугунов (б) в центрифугу (в)</p>  <p>а) б) в)</p>
<p>13. Двухслойные огнеупорные термокоррозионно-эрозийно-стойкие стаканы дозаторы (а) с диоксидциркониевыми вставками (б) для промковшей МНЛЗ; ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК», г. Жлобин</p>  <p>а) б)</p>	<p>14. Двухслойные термокоррозионно-эрозийно-стойкие стаканы дозаторы (СД) шибераго типа для промковшей МНЛЗ; ОАО «БМЗ – УКХ – «БМК», г. Жлобин</p> 	<p>15. Тепловые термостойкие экраны для станков клиновой прокатки (1, 2), плавильно-литьевых установок драгметаллов (3), производства оптического стекловолокна (4)</p> 
 <p>а)</p>	 <p>б)</p>	
<p>16. Заготовка (прессовка) (а), полученная изостатическим прессованием, для изготовления высокоэнергетических топливных электродов – монокристаллов (термоэммиттеров) (б) для плазменных ракетных двигателей (ПРД)</p>		

Закключение. Создание разнопрофильной технической керамики формируется на последовательных этапах материаловедческо-технологической логистики, представляющей *НИРовскую методологию стратегии и тактики разработки – исследования – создания – реализации физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии* – структурирования техногенного минерального сырья, в рамках системно-дифференцированной программно-методической формулы (схемы), где заданные «составы – структура – свойства» определяют «*проектируемый профильный материал*», который *трансформируется* на базе экспериментально-аналитических принципов в лабораторные, опытно-экспериментальные и **промышленные технологии** получения заданных **материалов-изделий**.

Сформированную **концепцию создания ТК** можно трактовать не только как удобную *методологию стратегии и тактики разработки – исследования и систематизации физико-химических процессов и механизмов структурирования материалов* с позиции керамического материаловедения, но и как *универсальный логистически действенный инструмент эффективного создания новых материалов*, качество и свойства которых обуславливается в первую очередь их *высокой химической чистотой*, с одной стороны, а с другой – созданием соответствующих дополнительных **кристаллографических – кристаллохимических функциональных структурных комплексов – модификаторов базовой структуры и свойств** создаваемых материалов на различных *материаловедческо-технологических стадиях* синтеза заданной технической керамики.

Основными *логистическими этапами и алгоритмами разработки, исследования, создания и реализации материалов-изделий из ТК* является решение материаловедческих проблем с позиции *физико-химического анализа процессов и механизмов* превращения техногенного минерального сырья в профильные материалы-изделия с использованием системных **фазовых диаграмм состояния; физической химии** (химической термодинамики и химической кинетики); **обратимых и необратимых физико-химических процессов**, протекающих в гетерогенных системах **при размоле – диспергировании, тепловой обработке и спекании**.

На базе выполненных *НИР-НИОТР* разработаны и реализованы **материаловедческо-технологические, концептуально-методологические логистические блок-схемы и алгоритмы эффективного создания профильных материалов – технологий – изделий – производств из технической керамики** (см. рис. 1), которые защищены патентами, а результаты исследований опубликованы в научных периодических изданиях Республики Беларусь и за рубежом.

УДК 621.791.722+621.791.92

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ОДНОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. И. ПОБОЛЬ, В. Г. ЗАЛЕССКИЙ

Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 621.791.722+621.791.92

OPTIMIZATION OF ELECTRON-BEAM SURFACING MODES FOR SINGLE-LAYER COATING WHEN RESTORING PRODUCTS FROM TITANIUM ALLOYS

A. I. POBOL, V. G. ZALESSKI

Аннотация. Исследовано влияние силы тока луча и интенсивности подачи проволоки при электронно-лучевой (ЭЛ) наплавке титанового сплава VT9 на толщину и равномерность получаемого восстанавливающего покрытия. Аддитивным методом проведено восстановление геометрии поверхности тонкостенной детали авиационной техники из VT9.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, аддитивные технологии, титановые сплавы, восстановление поверхности, профиль поверхности.

Abstract. The influence of the beam current and the wire feeding intensity during electron-beam (EB) surfacing of titanium alloy VT9 on the thickness and uniformity of the resulting restoring coating was investigated. The surface geometry of a thin-walled aircraft part made of VT9 was restored using the additive method.

Keywords: electron-beam surfacing, additive technologies, titanium alloys, surface restoration, surface profile.

Введение. Изделия из титановых сплавов дорогостоящие, что связано как с высокой стоимостью сырья, так и с большой трудоемкостью их механической обработки. Многие детали авиационной техники выполнены тонкостенными (с толщиной стенки около 1...5 мм) для снижения массы готового изделия. При этом критическим фактором получения качественных изделий из титановых сплавов является защита материала от активных газов. Повышенное содержание кислорода, азота и водорода в титане ведет к снижению механических свойств (ударной вязкости и пластичности), образованию пор и – в комбинации с образованием хрупких закалочных структур – холодных трещин [1]. Поэтому актуальной проблемой является восстановление деталей путем послойной электронно-лучевой наплавки.

Подробно исследуется технология аддитивного получения объемов из титановых сплавов при ЭЛ-наплавке проволоки [2, 3], однако не уделяется должного внимания формированию поверхности при однослойной наплавке.

Целью работы является оптимизация метода ЭЛ-наплавки для получения слоев требуемой толщины на изношенных участках тонкостенных изделий из титановых сплавов.

Материалы, оборудование и методики исследования. Для исследований методов ЭЛ-обработки образцов материалов в режиме наплавки покрытий использовалась установка, созданная в ФТИ НАН Беларуси с использованием аппаратуры производства Prvá Zváračská (Словакия). Рабочая камера установки ЭЛ-обработки выполнена из коррозионно-стойкой стали.

Эксперименты проводились с параметрами в диапазонах, указанных в табл. 1. Интенсивность подачи проволоки – отношение длины подаваемой проволоки к длине наплавленного валика.

Табл. 1. Управляющие параметры ЭЛ-наплавки

Напряжение, кВ	Ток луча, мА	Скорость наплавки, мм/с	Интенсивность подачи проволоки, мм/мм	Величина смещения валика, мм
55	9,3...14,9	4,4	0,125...1,0	1...4

В работе использована проволока из титанового сплава ВТ9 диаметром $1,2^{-0,12}$ мм, площадью поперечного сечения $1,13^{-0,214}$ мм² (ГОСТ 27265–87) и листовой титан $120 \times 90 \times 6,7$ мм.

Исследование профиля поверхности проводилось с помощью цифрового профилографа-профилометра Sytronic 25 (Taylor Hobson, Великобритания) по стандарту ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Обработка данных проводилась в комплектном программном обеспечении TalyProfileLite 7.1.7106. Использовались диапазон датчика 300 мкм, разрешение 0,01 мкм, длина трассы 16 и 25 мм.

Исследование режимов ЭЛ-наплавки одиночных валиков. Исследованы геометрические характеристики, профиль поверхности и внешний вид одиночно наплавленных валиков, полученных при интенсивности подачи проволоки 0,5 мм на 1 мм валика (рис. 1 и 2).

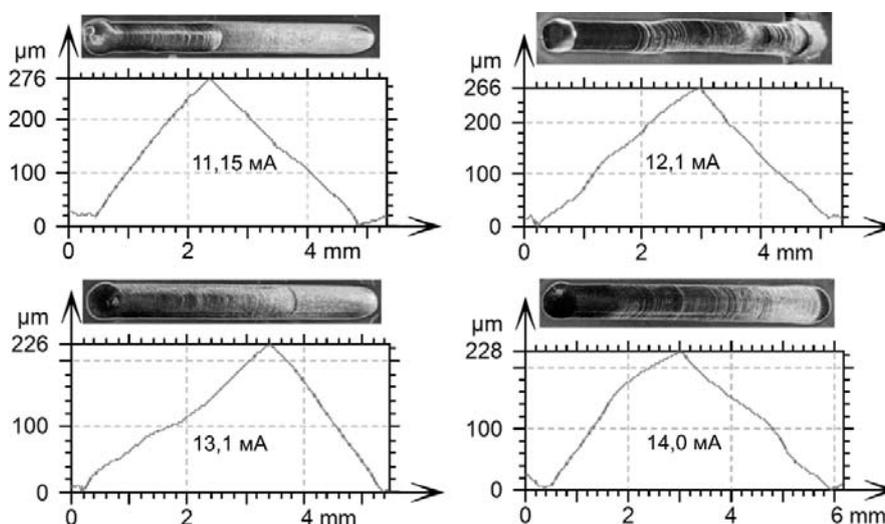


Рис. 1. Внешний вид одиночно наплавленных валиков и поперечный профиль поверхности при различных токах луча

Форма поперечного сечения валика близка к треугольной. Асимметричность объясняется отклонением места подачи наплавочной проволоки от центра пучка электронов. Увеличение силы тока луча приводит к увеличению ширины и уменьшению высоты наплавленного валика (рис. 2). Величины отклонений определены на уровне $\pm 0,1$ мА для тока луча, $0,1$ мм для ширины валика, 5% для высоты и площади валика.

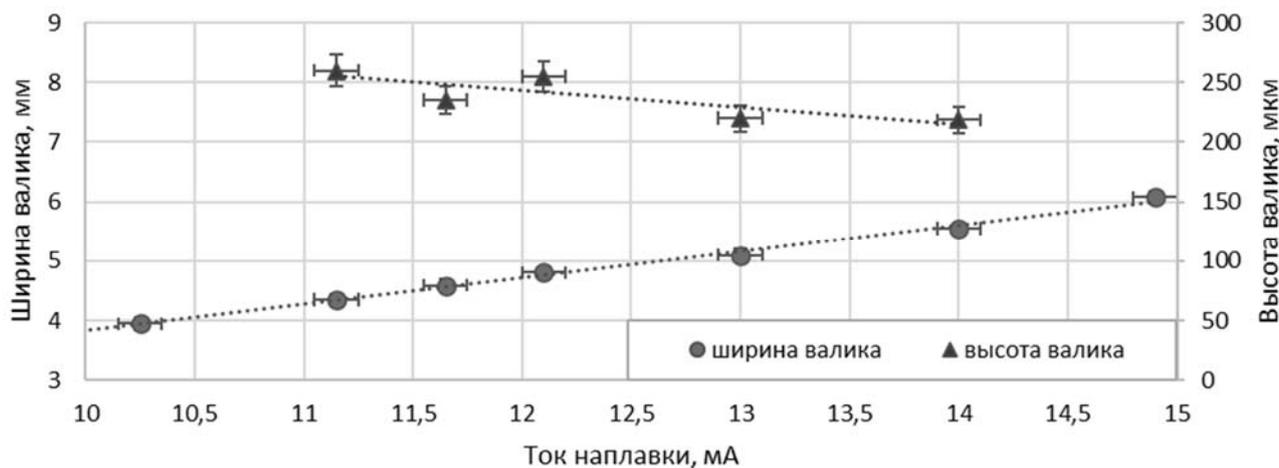


Рис. 2. Зависимость ширины и высоты одиночного валика от силы тока луча в процессе наплавки

Наиболее качественные валики с точки зрения геометрических параметров получены в диапазоне силы тока луча $11,5 \dots 14,0$ мА. При значениях силы тока $9,3$ и $10,25$ мА наблюдаются такие дефекты, как неравномерность высоты валиков, прерывание наплавленного слоя, образование отдельных крупных капель, что, вероятнее всего, связано с недостаточной для равномерного плавления проволоки энергией. При значении силы тока $14,9$ мА происходит слишком интенсивный ввод энергии и стабильность толщины наплавленного валика нарушается. Искажение траектории и повышенная чешуйчатость валика вызваны ручной корректировкой отклонения луча в процессе поиска его оптимального положения относительно проволоки.

Исследование равномерности получаемого покрытия при различной интенсивности подачи проволоки. Проведены исследования влияния интенсивности подачи титановой проволоки на равномерность получаемого покрытия. Использовано смещение 2 мм, ток луча $13,1$ мА. Поперечные профилограммы поверхности последовательно наплавленных валиков с различной интенсивностью подачи проволоки (рис. 3) показывают, что с её увеличением возрастает высота наплавленного слоя (с 50 до 320 мкм), снижается волнистость поверхности и величины подрезов основного металла в начале и конце зоны наплавки. При этом для различной интенсивности подачи проволоки волнистость имеет схожую периодичность, а впадины соответствуют максимальной плотности энергии луча. Также с увеличением интенсивности подачи проволоки усиливается эффект массопереноса наплаваемого материала в более разогретую зону завершения наплавки.

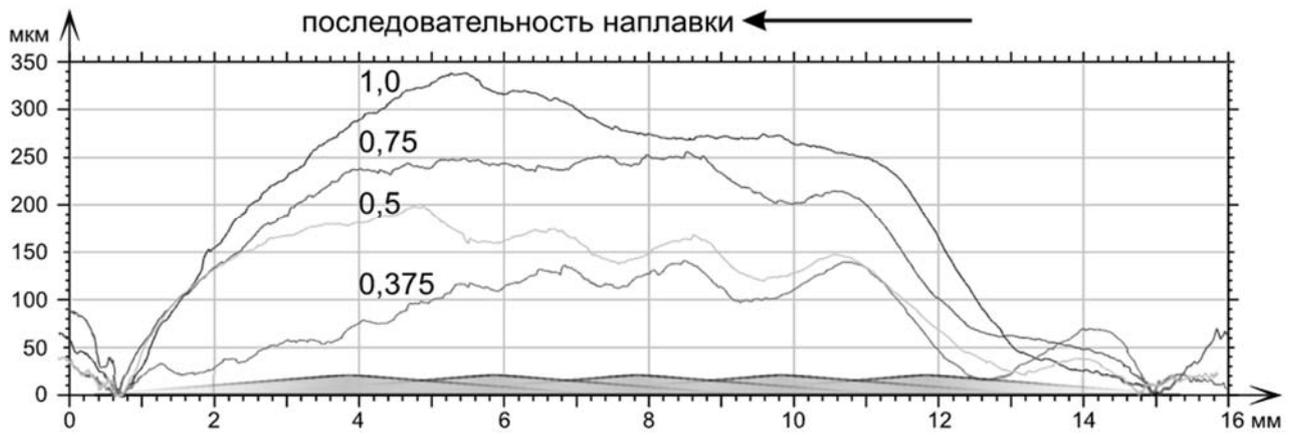


Рис. 3. Поперечные профилограммы поверхности последовательно наплавленных валков с различной интенсивностью подачи проволоки (показаны цифрами возле профилограмм)

По причине отсутствия на поверхностях образцов базовой плоскости определение нулевого уровня на профилограммах невозможно, поэтому величины высот и подрезов определены аналитически. На рис. 4 изображены ориентировочные величины высот наплавленных слоев и подрезов. Погрешности определены условно на уровне ± 20 мкм.

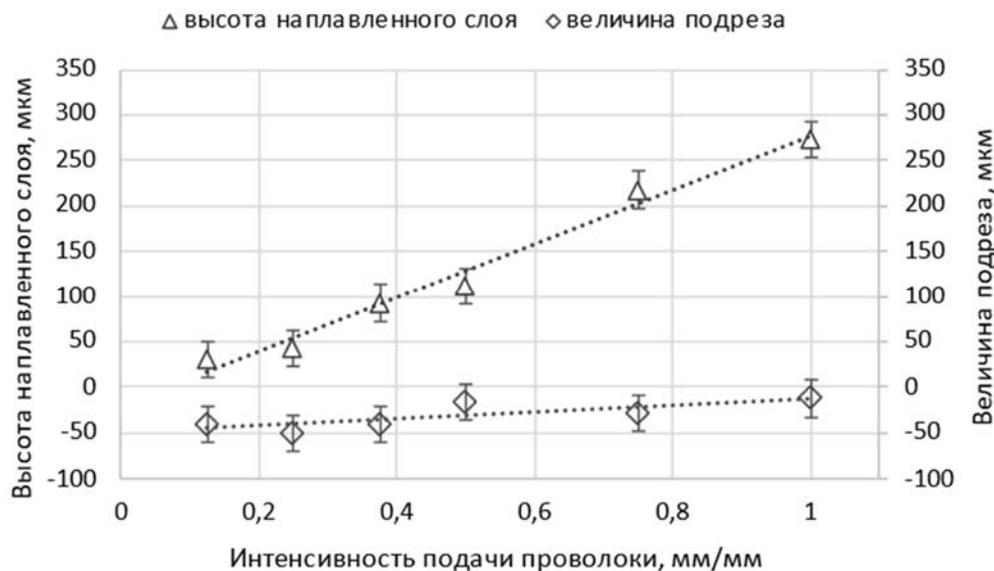


Рис. 4. Средние величины высот наплавленных слоев и подрезов

Восстановление опытной детали авиационной техники. Результаты исследования способствовали выбору оптимального режима ЭЛ-наплавки для восстановления детали «Гайка КТ 163.011» – элемента шасси самолетов МиГ и СУ различных модификаций (рис. 5). Подвергнутые ЭЛ-воздействию детали из ВТ9 проходят последующий двухступенчатый отжиг. В Физико-техническом институте разработана технология ионно-плазменного азотирования титановых сплавов, позволяющая дополнительно повысить стойкостно-эксплуатационные свойства восстановленного изделия.

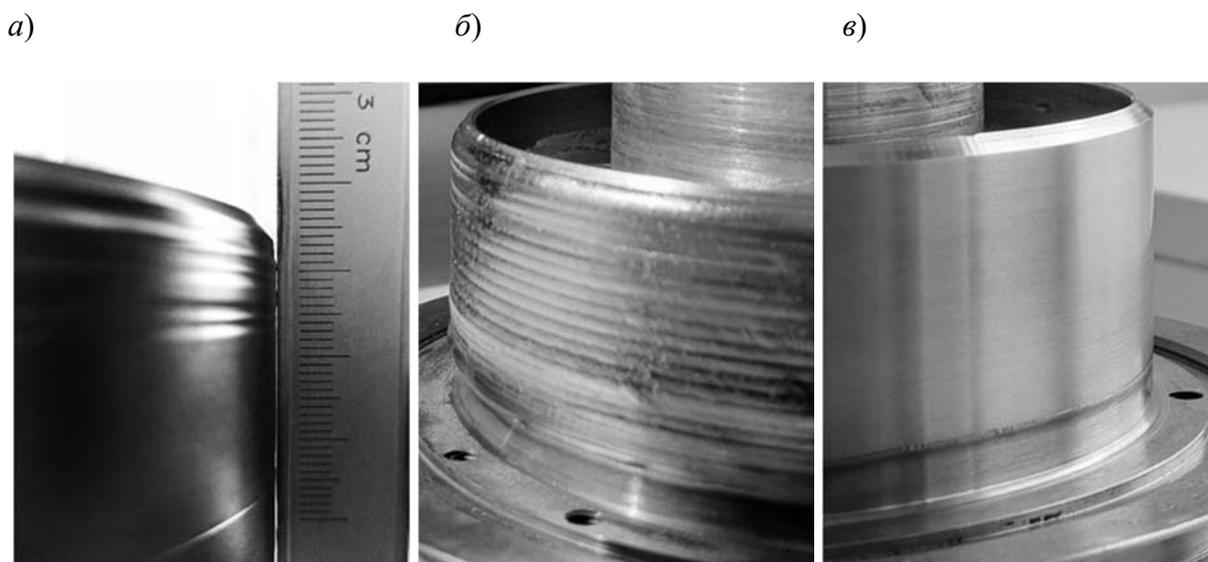


Рис. 5. Изношенная поверхность детали «Гайка 163.01» (а), деталь после ЭЛ-наплавки (б) и восстановленная деталь после токарной обработки (в)

Выводы. Выполнены исследования режимов ЭЛ-наплавки титановой проволоки ВТ9 на основу из сплава ВТ9 с получением одиночных валиков и сплошных слоев при различающихся силе тока луча (9,3...14,9мА), интенсивности подачи проволоки (0,125...1 мм проволоки на 1 мм протяженности валика).

Увеличение силы тока луча приводит к увеличению ширины и уменьшению высоты одиночно наплавленного валика. Чрезмерное снижение интенсивности подачи проволоки без корректировки энергетического воздействия приводит к увеличению волнистости поверхности и вызывает зачастую недопустимые подрезы на краях наплавленного слоя, а слишком высокая интенсивность подачи проволоки приводит к усилению эффекта массопереноса наплавленного материала в более разогретую зону завершения наплавки, что негативно сказывается на равномерности наплавленного слоя. Аддитивным методом проведено восстановление геометрии поверхности тонкостенной детали авиационной техники из ВТ9.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hrivnak, I.** Theory of Weldability of metals and alloys / I. Hrivnak. – Elsevier Science Publisher, 1991. – 372 p.
2. Titanium Alloy Repair with Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing Technology / P. Wanjara [et al.] // Adv. Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 2019. – P. 3979471-1-23.
3. Electron beam additive manufacturing with wire-analysis of the process / M. S. Węglowski [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1960. – P. 140015-1-6.

E-mail: a.pobol@gmail.com; v.zalesski@phti.by.

УДК 621.791

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ***И. Л. ПОБОЛЬ, В. Г. ЗАЛЕССКИЙ, А. И. ПОБОЛЬ***Физико-технический институт НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 621.791

MODERN ELECTRON-BEAM TECHNOLOGIES***I. L. POBOL, V. G. ZALESSKI, A. I. POBOL***

Аннотация. Представлены результаты создания оборудования и разработки технологий электронно-лучевой обработки материалов в ФТИ НАН Беларуси.

Ключевые слова: электронно-лучевое оборудование, плавка, сварка, пайка, нанесение покрытий, поверхностное упрочнение, аддитивные методы.

Abstract. The results of the equipment designing and development of technologies for electron beam treatment of materials at the PTI are presented.

Keywords: electron beam equipment, melting, welding, brazing, coating deposition, surface hardening, additive methods.

Электронно-лучевые (ЭЛ) технологии включают широкий спектр видов обработки материалов. Начало их развития в мире относится в конце 1950-х гг. В середине 1970-х гг. в ФТИ НАН Беларуси, в 1990-е гг. в Полоцком государственном университете были начаты исследования физических основ формирования потоков электронов и ионов в газоразрядных структурах для разработки и создания отечественных прототипов ЭЛ-оборудования и технологий [1–4].

Оборудование для выполнения ЭЛ-обработки. Основная часть ЭЛ-оборудования – энергетический комплекс, включающий в себя аппаратуру для формирования сфокусированного пучка электронов и управления его параметрами. Электронно-оптическая система (ЭОС) оснащается термокатодом, плазменным катодом или холодным катодом тлеющего разряда. Свойства источников электронов с плазменным эмиттером (ИЭП) определяются совокупным влиянием подвижности, положения и формы плазменной эмитирующей поверхности, начальных тепловых скоростей эмитированных электронов, потенциала стенок и геометрии эмиссионного канала, ионизации остаточного газа электронами пучка, формируемого в ЭОС. Разработанная физико-математическая модель ЭОС с плазменным эмиттером позволила обосновать роль плазменных электронов в формировании эмиссионного тока и эмитирующей плазмы, установить механизмы её формирования в канале с различным его потенциалом относительно плазмы, а также механизмы переключения эмиссионного тока из плазмы в пучок, объяснить причины возникновения неустойчивости эмиссионного тока и предложить способы его стабилизации, сформулировать критерий устойчивости эмиссии в плазменных эмиссионных системах с «точечным» и «широким» эмиттером [3, 4].

Созданные конструкции ИЭП на основе отражательного разряда с полым катодом и изолированным эмиттерным электродом, значение потенциала которого устанавливается автоматически в соответствии с потоками зарядов на него, а также ИЭП с анодным потенциалом эмиттерного электрода позволяют получать аксиальные и радиальные электронные пучки в широком диапазоне технологических параметров, применяемые в различных технологиях, от плазмохимии до электронно-лучевой сварки.

В ФТИ создан комплекс оборудования из нескольких ЭЛ-установок. Опытно-промышленная установка с мощностью луча до 15 кВт имеет следующие габариты вакуумной камеры: диаметр 1300 × 2500 мм (рис. 1). На этом оборудовании испытаны ИЭП, один из вариантов имеет следующие характеристики: ускоряющее напряжение – 5...30 кВ; напряжение горения разряда – 350 В; ток разряда – до 1 А; ток пучка – до 0,5 А; диаметр пучка – от 0,8 мм до 5 см. Создан и установлен в ОАО «МТЗ» энергоблок ЭЛС с плазменным источником электронов для установки типа такт-машины (рис. 2).



Рис. 1. Установка ЭЛУ-9Б/PZ EB 2,5–15

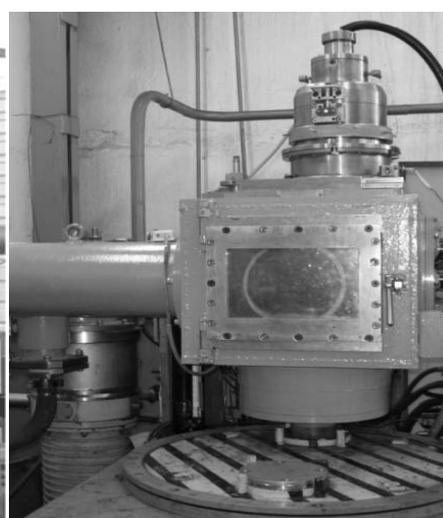


Рис. 2. Установка с ИЭП

Вид реализуемого электронно-лучевого физико-технологического процесса, интенсивность нагрева и охлаждения изделий и свойства материала после обработки определяются ускоряющим напряжением, мощностью пучка, плотностью энергии, режимом развертки электронного луча, временем воздействия или скоростью перемещения зоны нагрева. В работах авторов реализован ряд вариантов использования ЭЛ-воздействия.

Электронно-лучевая плавка металлов и сплавов – эффективный способ рафинирования и повышения качества металлов и сплавов. В ФТИ НАН Беларуси отработаны методы изготовления новых и регенерации изношенных катодов-мишеней для систем вакуумного распыления из Ti, Zr, Hf, сплавов Ti и Zr с Cr, Al, В, Мо и др. [2].

Получение неразъемных соединений пайкой. Получены теоретические и экспериментальные результаты для установления механизма получения соединения разнородных материалов с основой; разработаны математические модели, учитывающие смачиваемость соединяемых поверхностей расплавом,

напряжения, возникающие в процессе нагрева, диффузию адгезионно-активного элемента, что позволило создать метод пайки, обеспечивающий возможность получения лезвийного инструмента с высокой прочностью соединения сверхтвердых материалов (кубического нитрида бора и поликристаллического алмаза) с основой. Такой инструмент используется для лезвийной обработки высокотвердых материалов вместо их шлифования [2, 5].

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Это направление широко востребовано предприятиями Беларуси. Применительно к характерным изделиям машиностроения (шестерням и валам) решена задача получения сварного шва глубиной 5...35 мм (рис. 3, а; 4, а). В то же время при необходимости сварки тонколистовых, трудносвариваемых, высокоактивных материалов (ниобия, меди, титана и др.) может быть получен широкий шов с минимальными отклонениями геометрии от внутренней и наружной поверхностей детали (рис. 3, б). Примером таких изделий являются резонаторы для ускорителей частиц [6].

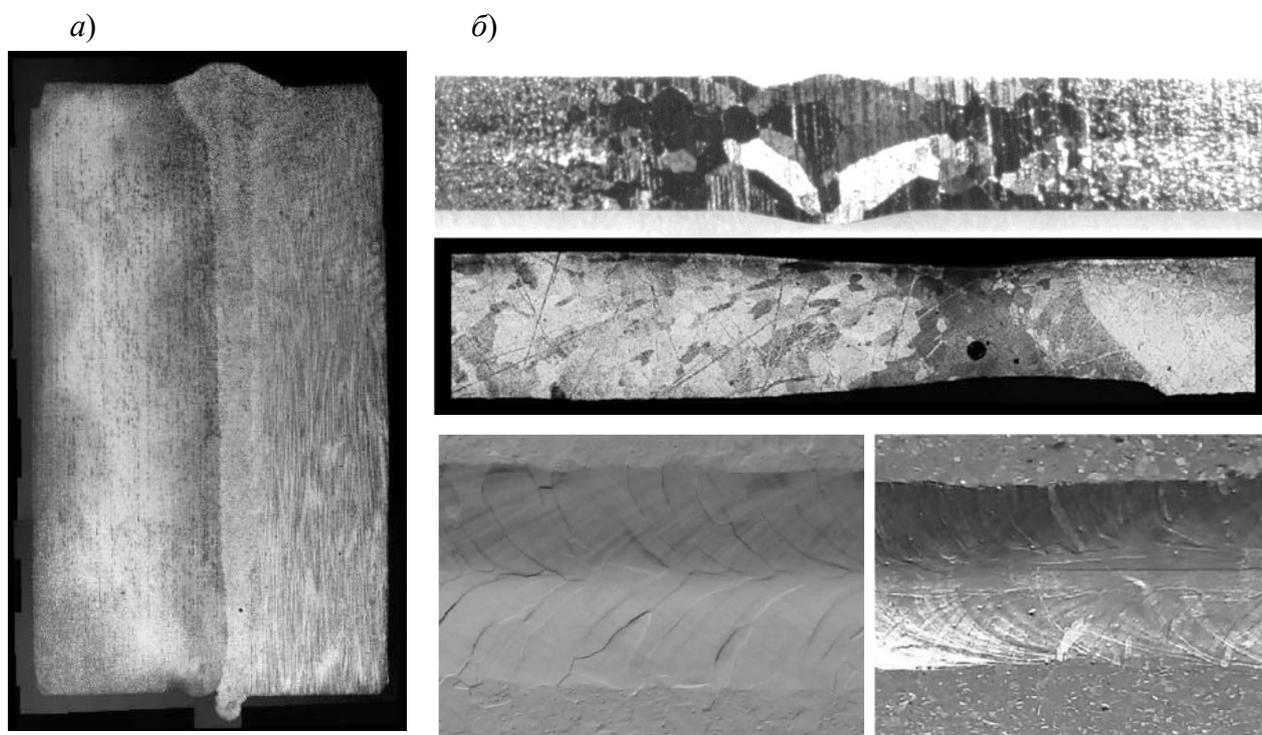


Рис. 3. Сварной шов ЭЛС глубиной 32 мм из сталей 25ХГТ и 40Х (а), соединения из тонколистовых материалов – особо чистого ниобия и меди: поперечные сечения и лицевая поверхность (б)

При изготовлении деталей сложной конфигурации использование ЭЛС позволяет выполнять их из нескольких заготовок вместо получения изделий из одной поковки, что снижает энергозатраты и материалоемкость изделий до 50 %. Совместно со специалистами ОАО «МАЗ» показано, что при замене технологии дуговой сварки на ЭЛС масса оси и полуоси прицепов может быть снижена на 40...50 кг. На примере детали «поворотный кулак – суппорт» (из сталей 40Х и 10ХСНД) в результате ЭЛС прочностные и особенно пластические характеристики металла сварного шва значительно превышают свойства металла, полученного с использованием дуговой сварки (деформация при растяжении повышена в 2 раза).

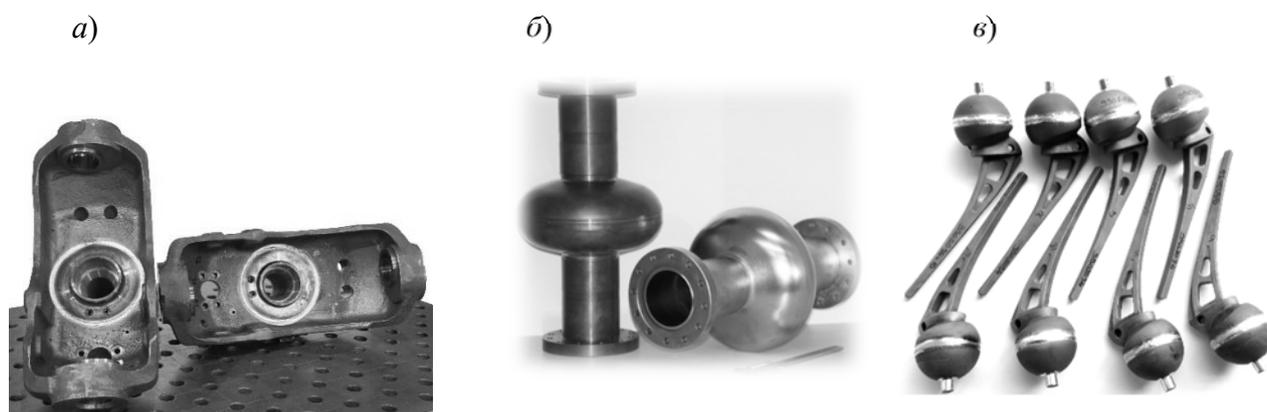


Рис. 4. Изделия, полученные с применением ЭЛС: картеры ОАО «МЗКТ» (а), сверхпроводящие СВЧ-резонаторы из меди и ниобия для ускорителей частиц (б), заготовки ножек имплантатов из сплава Co–Cr–Mo (в)

ФТИ выполняет НИР по созданию для ОИЯИ (Дубна) наукоемких СВЧ-сверхпроводящих резонаторов из особо чистого ниобия для ускорителей класса мегасайенс, что невозможно без использования ЭЛС. Разработан комплекс технологий и изготовлена партия сверхпроводящих эллиптических СВЧ-резонаторов на 1,3 ГГц (рис. 4, б) [6]. В настоящее время изготавливаются резонаторы для строящегося в ОИЯИ ускорительного комплекса NICA.

Совместно с ЗАО «Алтимед» выполняются заказы по обеспечению пациентов, нуждающихся в оперативном лечении в связи с переломами тазобедренного сустава. С использованием ЭЛС изготавливаются ножки цементной фиксации 11 типоразмеров из сплава Co–Cr–Mo в количестве нескольких тысяч изделий в год (рис. 4, в). Применение ЭЛС позволяет снизить массу имплантатов и их стоимость.

Нанесение покрытий ЭЛ-испарением и осаждением из паровой фазы многократно повышает эксплуатационный ресурс многих изделий (например, лопаток турбин). В ФТИ НАН Беларуси получил широкое развитие ЭЛ-метод нанесения на стеклянные и полимерные материалы одно- и многослойных покрытий из непроводящих и тугоплавких материалов с получением тонких слоев равномерной толщины, экранирующих электромагнитные излучения. Обеспечивается эффективность экранирования на 25...50 дБ электромагнитного поля в радиочастотном диапазоне длин волн (0,7...17 ГГц) [7].

Поверхностное упрочнение в режиме закалки сталей, чугунов и титановых сплавов приводит к дифференцированному упрочнению материала. Толщина модифицированного слоя при упрочнении в режиме закалки из твердого состояния изделий составляет 0,1...2 мм. Твердость конструкционных, инструментальных и подшипниковых сталей достигает 65...68 HRC, микротвердость – 10...11 ГПа [1, 2].

Аддитивные методы выращивания заготовок из металлов и сплавов реализуются путем ЭЛ-послойного выращивания 3D-структур на основе железа, никеля, титана, алюминия, меди с использованием исходных материалов в виде проволоки или порошка [8, 9]. Основной задачей является получение заготовки, свойства материала которой максимально близки к свойствам деформированного металла. Большое влияние на формирование микроструктуры приграничных зон

смежных слоев наплавки оказывает температура закристаллизовавшегося металла в момент наплавки на него следующего слоя и ЭЛ-постобработка наплавленных слоев.

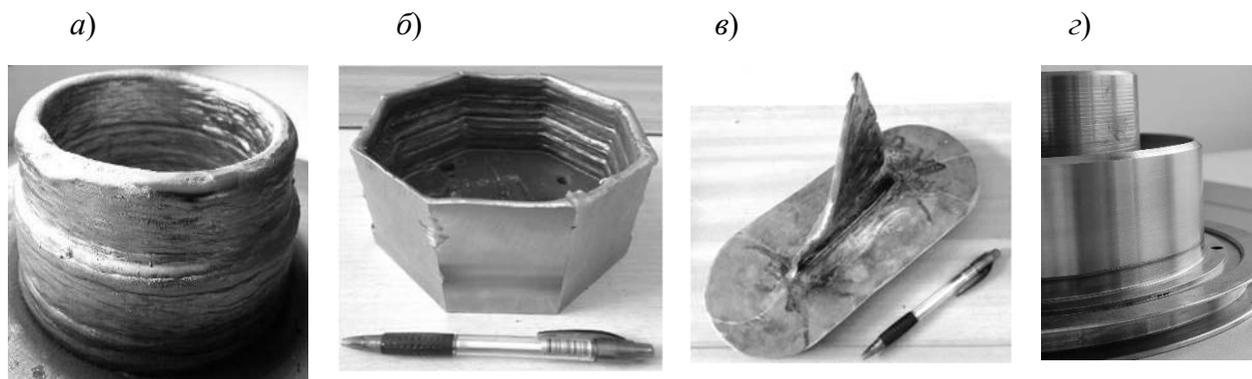


Рис. 5. Образцы, полученные методом ЭЛ-послойного формообразования, из стали LNM 304LSI (а, б) и титана ВТ1-0 (в). Деталь авиационного назначения из сплава ВТ9, восстановленная с использованием ЭЛ наплавки (з)

Комбинированные и совмещенные методы инженерии поверхности с ЭЛ-воздействием обеспечивают получение комплекса характеристик упрочненного изделия, которые невозможно достичь с применением традиционных методов упрочнения. Они реализованы наплавкой на стали и титановые сплавы износостойких материалов толщиной до 5 мм; получением на стали борсодержащих слоев с твердостью до HV 1100; нанесением TiO_2 и Ni-Ti, электролитических Cr и Ni, детонационных WC-Ni и WC-Co-покрытий на титановых сплавах с адгезионной прочностью до 210...220 МПа, Cr-, Ni-, Cu-Cr- и Ni-Cr-электролитических покрытий на титановых сплавах с коэффициентом трения до 0,07 и несущими нагрузками до 20 МПа; реализацией варианта ХТО+ЭЛ-нагрев сталей, повышающего твердость и толщину упрочненного слоя в 1,5–2,5 раза [1,8,9].

Апробация и внедрение разработанных технологий. Получены сертификат соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 (ISO 9001:2015) на систему менеджмента качества «Разработка технологической документации, производство и ремонт оборудования для обработки материалов при пониженном давлении с использованием электронно-ионно-плазменного воздействия», а также лицензия № 33134/576-4 Департамента по ядерной и радиационной безопасности МЧС на право выполнения монтажных, диагностических и ремонтно-восстановительных работ установок с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения, включая установки ЭЛС с ускоряющим напряжением до 100 кВ.

Выполняются услуги по ЭЛ-обработке изделий десятков наименований. Создание в 2017 г. в институте Отраслевой лаборатории электронно-лучевых и аддитивных технологий способствовало активизации сотрудничества института с предприятиями Министерства промышленности и других отраслей. Совместно с ОАО «МТЗ», ОАО «МЗШ», ОАО «МАЗ», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Амкордор», ОАО «СтанкоГомель», ЗАО «Алтимед», ОАО «МЗКТ», ОАО «ВЗЭП»

разрабатываются новые конструкции узлов, изготавливаемых из сталей, сплавов цветных металлов с использованием ЭЛ-обработки. Отработаны методы изготовления и ремонта валов, шестерен, зубчатых колес металлообрабатывающих станков, задних мостов, узлов коробок передач погрузчиков и автомобилей, разрабатываются новые технологии.

Заключение. В ФТИ НАН Беларуси создан научно-инжиниринговый центр, в котором решается широкий спектр задач по получению неразъемных соединений сваркой и пайкой, упрочнению, модифицированию поверхности металлических материалов на основе железа, титана, алюминия, меди. Во многих случаях успешное решение этих задач обеспечивается вследствие активного взаимодействия разработчиков и предприятий – потребителей услуг, технологий и оборудования института.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шипко, А. А.** Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева / А. А. Шипко, И. Л. Поболь, И. Г. Урбан. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 280 с.
2. Электронно-лучевая обработка материалов / В. Н. Алехнович [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2006. – 319 с.
3. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В. Т. Барченко [и др.]. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
4. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich [et al.] // High Temperature Material Processes. – 2017. – Vol. 21, № 2. – P. 143–159.
5. Electron beam activated brazing of cubic boron nitride to tungsten carbide cutting tools / J. Felba [et al.] // Vacuum. – 2001. – Vol. 62, № 2–3. – P. 171–180.
6. **Поболь, И. Л.** Создание сверхпроводящих ниобиевых резонаторов для ускорителей частиц / И. Л. Поболь, С. В. Юревич // Вес. НАН Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 2. – С. 44–50.
7. Выбор материалов для прозрачных в видимом свете многослойных экранирующих покрытий / Г. В. Марков [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларусі, 2019. – С. 239–245.
8. **Поболь, А. И.** Нанесение покрытий с использованием электронно-лучевого воздействия / А. И. Поболь, Г. Г. Горанский // Композиционные материалы и защитные покрытия: материалы Междунар. науч.-техн. семинара. – Минск: ОИМ НАН Беларусі, 2012. – С. 133–138.
9. Formation of a porous titanium part under directed energy deposition: theory and experiment / M. A. Anisimova [et al.] // High Temperature Material Processes. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 1–23.

E-mail: pobol.igor@gmail.com.

УДК 621.791

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗВЕРТКИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА НА ФОРМУ ШВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 30ХГСА

А. П. СЛИВА, А. Ю. МАРЧЕНКОВ, Д. А. ЖГУТ, А. А. ПАНЬКИНА, В. М. МАТЮНИН

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 621.791

INFLUENCE OF ELECTRON BEAM OSCILLATION PARAMETERS ON WELD SHAPE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 30KHGSA WELD LOCAL ZONES

A. P. SLIVA, A. YU. MARCHENKOV, D. A. ZHGUT, A. A. PANKINA, V. M. MATIUNIN

Аннотация. В работе приводятся исследования влияния амплитуды и частоты развертки электронного луча типа «пила» на форму проплавления и механические свойства сварных швов из высокопрочной стали 30ХГСА. Показано, что развертка существенно влияет на формирование сварного шва и ее применение позволяет получать качественные сварные соединения со сквозным проплавлением без использования корневых подкладок. Установлено влияние развертки на механические свойства, в частности, получены сварные швы с повышенной пластичностью металла.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, механические свойства, кинетическое индентирование, сталь 30ХГСА, развертка электронного луча.

Abstract. The paper presents studies concerning the influence of the amplitude and frequency of the «saw» type electron beam oscillation on the penetration shape and the mechanical properties of welds made of high-strength steel 30KhGSA. It is shown that the oscillation significantly affects the formation of the weld and its use makes it possible to obtain high-quality welded joints with through penetration and without the use of root back-up plate. The effect on mechanical properties has also been established by obtaining welded joints with increased metal ductility.

Keywords: electron beam welding, mechanical properties, instrumented indentation, 30KhGSA steel, electron beam oscillation.

Введение. При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) параметры развертки электронного луча оказывают сильное влияние на форму проплавления сварного шва. Это отражается не только на структурно-фазовом состоянии металла, но и на его физико-механических свойствах. В данном случае особый интерес представляет исследование развертки электронного луча типа «пила». Управляя параметрами развертки электронного луча, можно сформировать сварной шов с усилением в его вершине и получить необходимый уровень механических свойств металла. Однако прочностные и пластические характеристики металла в различных локальных зонах сварного соединения могут существенно различаться [1–4], что необходимо учитывать при анализе работоспособности сварного соединения [5–6]. Для количественной оценки этих механических характеристик целесообразно использовать кинетическое (инструментальное)

индентирование с регистрацией диаграмм вдавливания, что позволяет получать информацию о распределении механических свойств металла по всему сварному соединению, включая основной металл, зону термического влияния, металл шва. В настоящее время кинетическое индентирование успешно развивается, появляются новые нормативные документы, методики и приборы для регистрации и обработки диаграмм вдавливания [7–10].

В статье изложены результаты исследований влияния параметров развертки электронного луча (амплитуда развертки, частота развертки) типа «пила» на форму проплавления и механические свойства металла сварного соединения в различных локальных зонах, выявленных кинетическим индентированием с использованием методик, разработанных в НИУ «МЭИ» авторами статьи.

Методики проведения исследований. Исследование влияния параметров развертки электронного луча на формирование сварных швов проводили на пластинах из высокопрочной стали 30ХГСА толщиной 22 мм. ЭЛС проводилась на установке для электронно-лучевой сварки АЭЛТК-344-12 с ускоряющим напряжением 60 кВ с применением развертки типа «пила» (рис. 1) и гарантированным сквозным проплавлением.

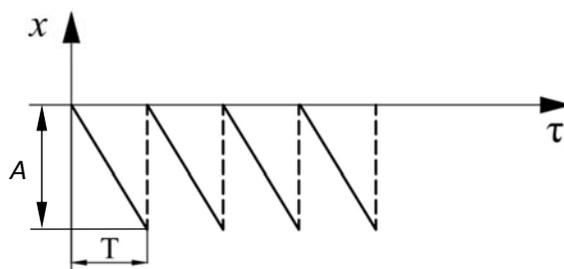


Рис. 1. Схема движения луча при развертке типа «пила» (T – период развертки, $T = 1/f$; A – амплитуда развертки, мм; f – частота развертки; τ – текущее время; x – ось вдоль направления перемещения луча)

Режимы сварки: ток луча $I_n = 90$ мА; скорость сварки $v_{св} = 15$ м/ч; ток «острой» фокусировки $I_\phi = 757$ мА; рабочее расстояние $L_{раб} = 150$ мм. Параметры развертки электронного луча сведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры разверток при сквозном проплавлении

Номер шва	Амплитуда A , мм	Частота f , Гц	Средняя ширина шва $B_{ср}$, мм	Усиление ΔF , мм ²
0	–	–	1,59	–2,36
1.1	1,2	25	1,98	–1,32
1.2		31	2,03	0,24
1.3		37	2,34	–0,33
1.4		44	2,11	–1,54
1.5		50	1,57	–1,76
2.1	1,6	25	2,42	3,40
2.2		31	2,01	1,16
2.3		38	1,98	0,15
2.4		44	1,97	3,96
2.5		50	2,19	–0,31

Оценку формирования сварных швов выполняли по величине площади усиления F_y (или подреза F_n) на лицевой поверхности. Если величина усиления $\Delta F = F_y - F_n > 0$, то такое формирование считается благоприятным (рис. 2, а).

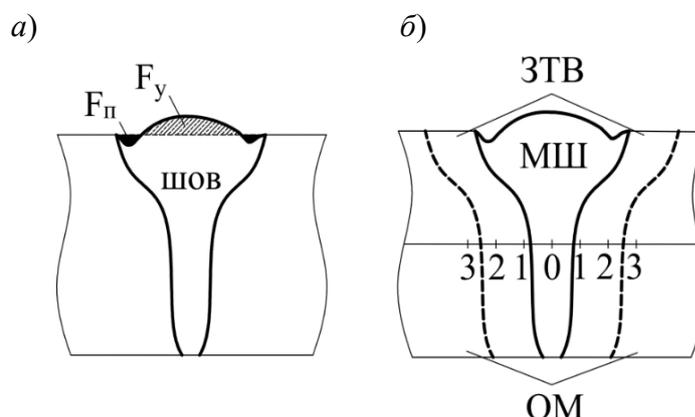


Рис. 2. Схема формирования сварного шва (а) и зон индентирования (б): ОМ – основной металл; ЗТВ – зона термического влияния; МШ – металл шва

Для оценки комплекса механических свойств металла в локальных зонах сварных соединений выполнено кинетическое индентирование на универсальной машине Instron 5982 в режиме сжатия с регистрацией диаграмм вдавливания: индентор сферический $D = 2,5$ мм; скорость перемещения индентора – 0,5 мм/мин. Количественная оценка механических свойств выполнялась по методикам, основанным на связи кинетических диаграмм вдавливания «невосстановленная твердость по Бринеллю HB_t – относительная глубина невосстановленного отпечатка t/R » с диаграммами растяжения «напряжение σ – относительное удлинение δ », разработанным в НИУ «МЭИ» [7].

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. При ЭЛС с глубоким сквозным проплавлением металл сварочной ванны не удерживается силами поверхностного натяжения и значительный объем вытекает со стороны корня шва, в результате чего на поверхности шва образуются подрезы и занижения (рис. 3). Формирование таких дефектов характерно для многих способов сварки со сквозным проплавлением, когда объем сварочной ванны значителен. Для предотвращения вытекания металла из канала проплавления используют корневые подкладки либо увеличивают скорость сварки [11], если это возможно. Кроме того, перспективным способом является применение развертки электронного луча типа «пила», которая влияет на гидродинамические процессы и интенсифицирует перенос металла в хвостовую часть сварочной ванны. Эффективность такого способа показана на сплаве на основе алюминия АМг6 [12] и подтверждена математическим моделированием на стали 30ХГСА [13].

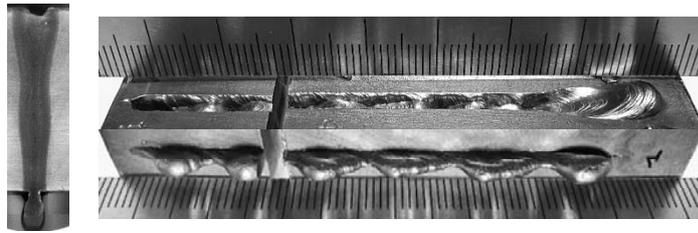


Рис. 3. Внешний вид поверхности и корня сварного шва без развертки электронного луча

При использовании такого метода формирование шва существенно зависит от амплитуды и частоты развертки. На рис. 4 приведены фотографии лицевой и корневой поверхности швов стали 30ХГСА для режимов развертки, указанных в табл. 1. Очевидно, что уже при частоте развертки 25 Гц для обеих амплитуд занижение в вершине шва и объем вытекающего со стороны корня металла существенно меньше, чем сварке без развертки (см. рис. 3). Вместе с тем наблюдается волнистость поверхности шва. На частоте 25 Гц расстояние между соседними горбами волн 10...15 мм для $A = 1,2$ мм и 15...20 мм для $A = 1,6$ мм.

f , Гц	$A = 1,2$ мм (1.)	$A = 1,6$ мм (2.)
25 (_1)		
31 (_2)		
38 (_3)		
44 (_4)		
50 (_5)		

Рис. 4. Внешний вид сварных швов с поверхности и корня

С увеличением частоты характер формирования волнистости меняется. При $f = 31$ Гц формирование шва стабильное и периодичности не выявляется, а объем вытекающего металла становится еще меньше. Также периодичность горбов сложно проследить на частотах 38 Гц, однако здесь формирование менее стабильно, и для $A = 1,2$ мм объем вытекающего металла увеличивается, в то время как для $A = 1,6$ мм продолжает сокращаться и имеет минимальное значение среди всех рассмотренных режимов развертки. При $f = 44$ Гц восстанавливается четкая периодичность горбов, которая начинает совпадать с каплями металла, вытекающими с корня шва. При этом для $A = 1,2$ мм горбы ниже, чем для $A = 1,6$ мм, а объем вытекающего металла, соответственно, больше. На частоте развертки 50 Гц объем существенно увеличивается и формируется занижение в вершине шва для обеих амплитуд развертки.

Средняя ширина шва $B_{ср}$ и усиление на лицевой поверхности ΔF демонстрируют зависимость от частоты развертки (рис. 5).

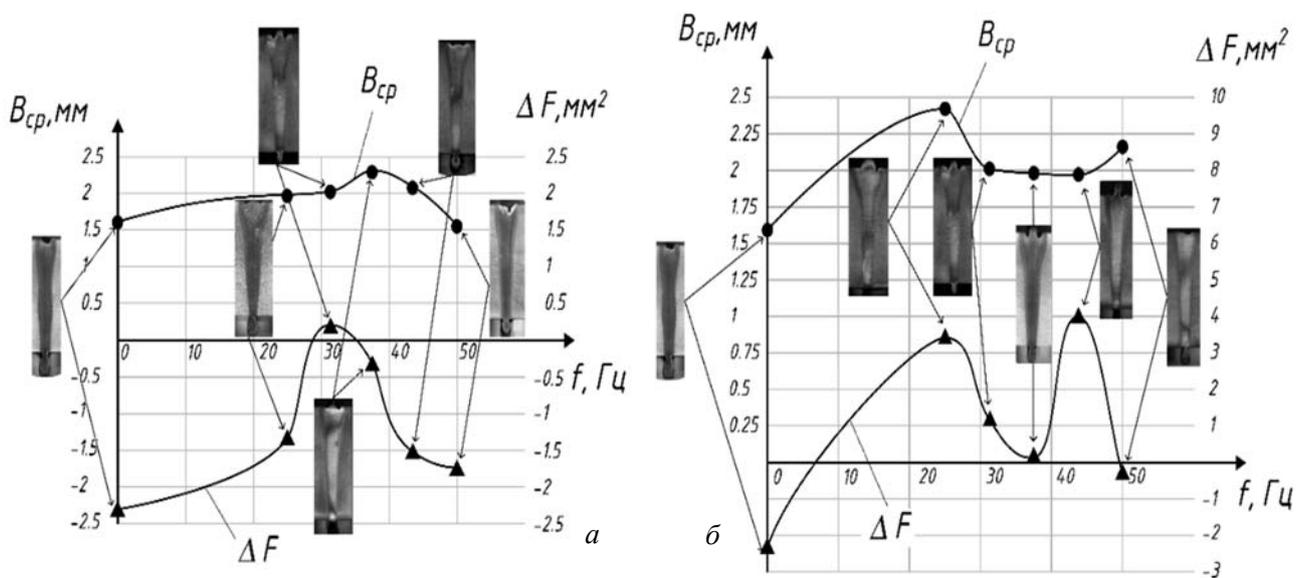


Рис. 5. Зависимости $B_{ср}$ и ΔF от частоты развертки f для амплитуды A 1,2 мм (а) и 1,6 мм (б)

Максимум ΔF для $A = 1,2$ мм соответствует $f = 31$ Гц, что подтверждается качественной оценкой объема вытекающего металла с корня шва. При сварке без развертки и при $f = 50$ Гц площадь занижения максимальна и также соответствует наблюдаемому объему вытекающего металла с корня шва. Для $A = 1,2$ мм на графиках наблюдается провал усиления ΔF для частот f , равных 31 и 38 Гц, однако качественная оценка формирования поверхности и корня шва не подтверждает этой тенденции: в этой области частот должен быть максимум усиления. Такая зависимость, по-видимому, связана с неудачным расположением оцениваемых сечений – в начале сварного шва, поэтому требует уточнения.

Для всех сварных швов наблюдается в разной степени неравномерное распределение механических свойств в различных зонах сварных соединений (рис. 6). В металле шва предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_B резко увеличиваются для всех параметров развертки (достигает 1600 МПа). Одновременно понижается пластичность, характеризуемая относительным равномерным удлинением δ_p до 2 %...3 % при режимах сварки без развертки. Это делает сварное соединение склонным к хрупкому разрушению, несмотря на высокую прочность металла шва. При этом сварные швы с разверткой электронного луча 1.3 и 2.4 имеют более высокие значения пластичности – около 4 % и 6 % соответственно и существенно меньшие значения $\sigma_{0,2}$ и σ_B .

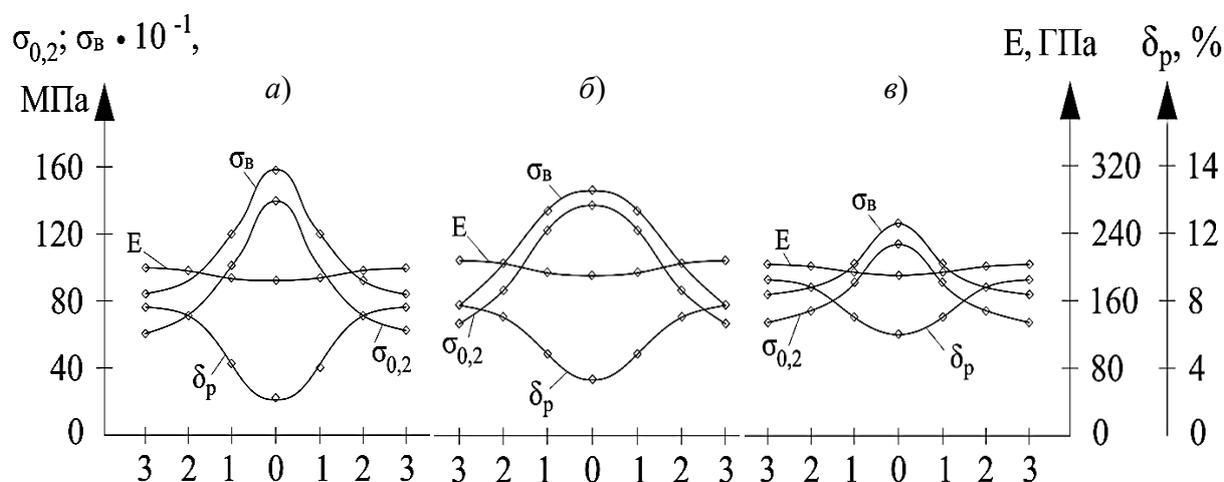


Рис. 6. Распределения механических свойств металла в контрольных точках сварных соединений, полученных ЭЛС на режимах 0 (а), 1.3 (б), 2.4 (в)

Выводы. Исследования влияния развертки электронного луча на формирование сварного шва из высокопрочной стали 30ХГСА показали, что, варьируя амплитуду и частоту развертки, можно изменять форму проплавления, ширину и усиление шва. Это дает возможность получать качественные сварные соединения без формирования дефектов типа занижений в вершине шва со сквозным проплавлением без применения корневых подкладок.

Установлено, что развертка луча типа «пила» с частотой 38 Гц и амплитудой 1,6 мм позволяет повысить относительное равномерное удлинение металла шва δ_p до 6 %.

Исследование проведено в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of Electron Beam Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy / S. Thakare [et al.] // Proceedings of the 23rd IFHTSE Congress. – 2016. – P. 18–21.
2. **Dzioba, I.** The Material Properties of Different Zones of Joints Welded Using a Laser / I. Dzioba, T. Pala, R. Pała // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 874. – P. 3–8.
3. Investigation of the physical and mechanical properties in different zones of the welded nitrogen-containing austenitic steel under elastoplastic deformation / E. Putilova [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785, № 1. – P. 040051.
4. **Oktadinata, H.** Microstructure and hardness profile of dissimilar lap joint of type 304 stainless steel to SS400 carbon steel / H. Oktadinata, A. Ganda Putra // Metal Indonesia. – 2019. – Vol. 41, № 2. – P. 46–53.
5. Structure and properties of carbon steel to duplex stainless steel submerged arc welds / N. A. Pherson [et al.] // Materials science and technology. – 2003. – Vol. 19, № 2. – P. 219–226.
6. **Rekik, W.** Identification of the Weakest Metallurgical Zone on Fracture Behavior of an Undermatched Welded Joint / W. Rekik, O. Ancelet, C. Gardin // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3491–3500.
7. **Матюнин, В. М.** Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В. М. Матюнин. – Москва: МЭИ, 2015. – 288 с.
8. **Oliver, W. C.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of materials research. – 2004. – Vol. 19, № 1. – P. 3–20.
9. **Ogar, P.** Energy approach to determine mechanical properties of materials from the kinetic diagram of spherical indentation / P. Ogar, V. Kushnarev, I. Kobzova // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 2342–2346.
10. Evaluation of Young's modulus of construction materials by instrumented indentation using a ball indenter / V. M. Matyunin [et al.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87, № 8. – С. 64–68.
11. Влияние скорости сварки на свободное формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением / Е. В. Терентьев [и др.] // Сварочное производство. – 2014. – № 2. – С. 25–29.
12. EBW of aluminium alloys with application of electron beam oscillation / A. P. Sliva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1089 (1). – P. 012056.
13. Physical Understanding of Active Control of Beam Scanning in Preventing Top Concavity in Electron Beam Welding / M. Luo [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2022. – Vol. 53 (9). – P. 3369–3380.

E-mail: slivaap@mpei.ru.

УДК 621.3

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В КАЧЕСТВЕ ТРЕХФАЗНЫХ СВАРОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

А. С. ТРЕТЬЯКОВ, О. А. КАПИТОНОВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.3

APPLICATION OF MATRIX FREQUENCY CONVERTERS AS THREEPHASE WELDING POWER SUPPLIES

A. S. TRETSIAKOU, O. A. KAPITONAU

Аннотация. В статье представлены краткие теоретические сведения о современных однофазных сварочных инверторах, рассмотрены их сильные и слабые стороны. Рассмотрен вариант сварочного инвертора на основе матричного преобразователя частоты, позволяющего получить лучшие энергетические характеристики за счет отсутствия звена постоянного тока.

Ключевые слова: сварочный инвертор, матричный преобразователь частоты, звено постоянного тока, энергетические характеристики.

Abstract. The article presents brief theoretical information about modern single-phase welding inverters, their strengths and weaknesses are considered. A variant of a welding inverter based on a matrix frequency converter is considered, which allows obtaining the best energy characteristics due to the absence of a direct current link.

Keywords: welding inverter, matrix frequency converter, DC link, energy characteristics.

Сегодня в повседневных сварочных работах большую популярность заняли однофазные сварочные инверторы. Небольшие по размерам, они имеют много преимуществ:

- высокий коэффициент полезного действия (до 0,95);
- нечувствительность к перепадам напряжения питания;
- точная настройка тока сварки;
- малый вес и габариты;
- простой и интуитивно понятный интерфейс по управлению сварочным инвертором.

Такие аппараты также имеют и ряд недостатков:

- высокая цена;
- чувствительность к ряду факторов, что может вызвать неисправность инвертора (пыль, перепад температур, конденсат и т. д.);
- высокая стоимость ремонта.

В настоящее время все большее внимание уделяется повышению качества источников питания: повышению КПД, минимизации гармонических искажений потребляемого тока, повышению коэффициента мощности (КМ), улучшению массогабаритных характеристик, повышению динамических характеристик.

Указанные характеристики достигаются путем применения дополнительного звена преобразования, обычно это повышающий корректор коэффициента мощности. Введение дополнительного преобразователя снижает КПД источника на 2 %...3 % и заметно повышает его стоимость.

Большинство современных сварочных преобразователей собраны по схеме «сетевой выпрямитель – звено постоянного тока – инвертор – высокочастотный трансформатор – выходной выпрямитель». С точки зрения энергетики двойное преобразование энергии ухудшает коэффициент полезного действия. Кроме того, подобная конструкция силовой части имеет достаточно большой уровень помех, влияющих на качество сварки.

Одним из путей, решающих вышеуказанные проблемы, может быть применение матричного преобразователя частоты (МПЧ) [1].

Матричные преобразователи частоты – одно из современных направлений развития частотных преобразователей.

МПЧ являются преобразователями энергии переменного тока с непосредственной связью. Они не содержат звена постоянного тока и связанного с ним фильтра и осуществляют однократное преобразование энергии.

Типовая структура матричного преобразователя частоты с трехфазным входом и трехфазным выходом представлена на рис. 1.

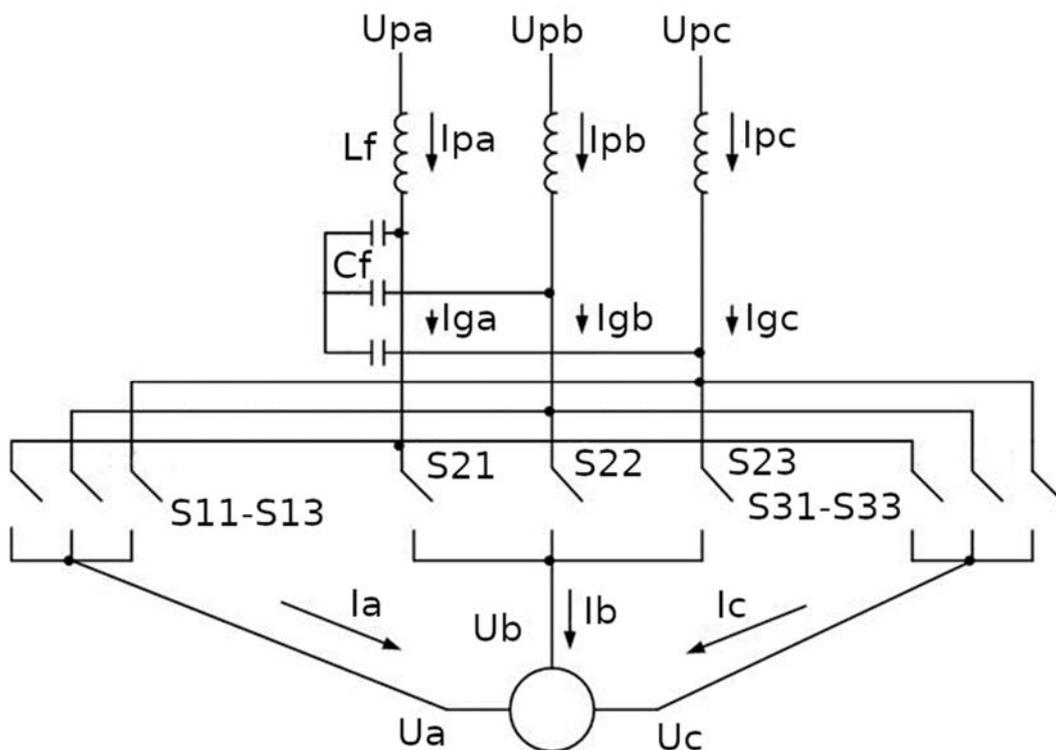


Рис. 1. Структурная схема матричного преобразователя частоты

Отличительной особенностью таких преобразователей является увеличенное количество силовых ключей. В основе конструкции МПЧ лежит двунаправленный переключатель на базе IGBT-модуля. Подключение таких ключей напоминает матрицу, откуда и название данного класса

преобразователей. Как правило, используется девять двусторонних IGBT-модулей. Отсюда восемнадцать силовых ключей вместо шести у преобразователей частоты со звеном постоянного тока.

В настоящее время разработано большое количество структур МПЧ с уменьшенным числом силовых ключей. Каждая из таких структур имеет определенные ограничения по сравнению с рассмотренной выше полной схемой и может применяться в том случае, если данные ограничения не влияют на работу питаемой преобразователем нагрузки. Также существенное снижение количества необходимых силовых ключей может быть достигнуто у преобразователя с трехфазным входом и однофазным, а не трехфазным выходом.

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока содержат фильтр на основе конденсатора большой емкости, подключаемый после неуправляемого выпрямителя. При питании такого преобразователя однофазным переменным напряжением достаточно сложно добиться полного подавления пульсаций выпрямленного напряжения с частотой 100 Гц и кратных данной частоте гармонических составляющих. Матричный преобразователь частоты с трехфазным питанием имеет возможность активного подавления низкочастотных составляющих входного питающего напряжения в силу своего принципа работы и отсутствия звена постоянного тока.

В настоящее время различными группами исследователей ведутся разработки вариантов применения сварочных инверторов на базе МПЧ с трансформаторной развязкой [2–5]. В качестве трансформатора может выступать одно- или двухтактный высокочастотный трансформатор. На рис. 2 представлена структурная схема одного из вариантов сварочного инвертора на базе МПЧ.

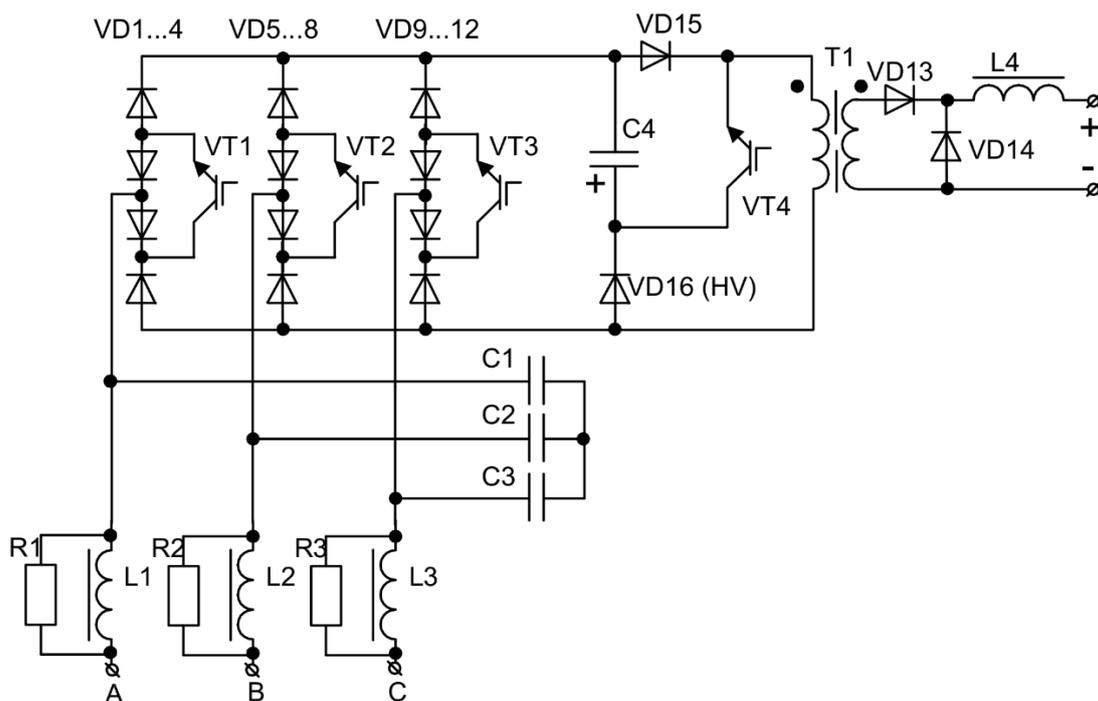


Рис. 2. Структурная схема сварочного инвертора на базе МПЧ

Схема состоит из входного фильтра гармоник, системы из трех двунаправленных полупроводниковых ключей, трансформатора и выходного высокочастотного двухполупериодного выпрямителя со сглаживающим дросселем на выходе. Последовательность переключения ключей выбирается так, чтобы входной ток источника был синусоидальным и совпадал по фазе с соответствующими фазными напряжениями.

Как показано в [3–5], применение таких решений позволяет:

- снизить потери энергии в преобразователе за счет исключения звена постоянного тока;
- снизить потери в сети;
- улучшить спектральный состав питающего напряжения.

Недостатком такого варианта реализации преобразователя является необходимость питания от трехфазной сети.

Существуют варианты однофазных сварочных инверторов, в которых исключено звено постоянного тока [5].

Но особенности такой конструкции не позволяют получить высокие энергетические характеристики и высокое качество сварки. Матричный преобразователь с трехфазным питанием обладает преимуществом перед однофазными преобразователями, поскольку мгновенная мощность в трехфазной сети является постоянной величиной, а в однофазной пульсирует с двойной частотой напряжения сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Szczęśniak, P.** AC–AC power electronic converters without DC energy storage: A review / P. Szczęśniak, J. Kaniewski, M. Jarnut // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – Vol. 92. – P. 483–497.
2. **Бурлака, В. В.** Трехфазные сварочные источники прямого преобразования с активной коррекцией коэффициента мощности / В. В. Бурлака // *Вісник приазовського державного технічного університету*. – 2013. – № 26. – С. 210–215.
3. **Рудык, С. Д.** Перспективные источники сварочного тока / С. Д. Рудык, В. Е. Турчанинов, С. Н. Флоренцев // *Электротехника*. – 1998. – № 7. – С. 8–13.
4. **Itoh, J.** High Efficiency High-Frequency Link Converter with AC/AC Direct Converter Technology / J. Itoh, T. Iida, D. Matsumura // *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. – 2007. – Vol. 127-D, № 8. – P. 822–828.
5. **Rudyk, S. D.** Promising welding power supplies / S. D. Rudyk, V. E. Turchaninov, S. N. Florentsev // *Electrical Engineering*. – 1998. – № 7. – P. 8–13.

E-mail: loggie121@gmail.com; kapitonov1987@gmail.com.

УДК 621.791

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИКАТОРА С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В СОСТАВЕ ШИХТЫ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДА УОНИ 13/55 И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА

Н. И. УРБАНОВИЧ, Т. И. БЕНДИК, В. Ю. СЕРЕДА

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.791

APPLICATIONS OF THE MODIFIER WITH ULTRAFINE PARTICLES IN THE COMPOSITION OF THE COATING CHARGE OF THE UONI 13/55 ELECTRODE AND ITS EFFECT ON THE PROPERTIES OF THE WELD METAL

N. I. URBANOVICH, T. I. BENDIK, V. Y. SEREDA

Аннотация. Ввод модификатора в покрытие электрода позволил повысить сварочно-технологические свойства покрытого электрода и пластичность металла шва.

Ключевые слова: электрод, покрытие, модифицирующая добавка, сварочно-технологические свойства, металл шва.

Abstract. The introduction of the modifier into the electrode coating made it possible to increase the welding and technological properties of the coated electrode and the ductility of the weld metal.

Keywords: electrode, coating, modifying additive, welding and technological properties, weld metal.

Значение ручной дуговой сварки покрытым электродом в промышленности не уменьшается и сегодня, особенно при монтаже и ремонте рядовых и ответственных конструкций из различных марок сталей, цветных металлов и их сплавов. Получение бездефектного сварного соединения с требуемыми эксплуатационными свойствами в первую очередь достигается за счет использования качественных сварочных материалов, которые непосредственно участвуют в процессе сварки и обеспечивают возможность как стабильного протекания самого процесса, так и получение качественного сварного соединения с требуемыми характеристиками. Одним из факторов, влияющих на обеспечение стабильного протекания процесса дуговой сварки и получение качественного сварного соединения, является уровень потребительских свойств электродов, к показателям которых относятся их сварочно-технологические свойства.

Известно, что повысить технологические свойства покрытых электродов можно за счет использования в покрытии дисперсных, ультрадисперсных и наноразмерных частиц.

В работе представлены результаты исследований влияния модификатора, введенного в состав шихты покрытия в количестве 1 % при изготовлении экспериментальных электродов УОНИ 13/55 на их сварочно-технологические

свойства и механические свойства металла шва. В качестве модификатора использовали отход, полученный в результате рассева модифицирующей добавки, применяемой для модифицирования чугунов и сталей. Отход представляет собой смесь ультрадисперсных частиц, при этом в его состав входят щелочно-земельные металлы в виде карбонатов. Важными показателями сварочно-технологических свойств электродов являются длина разрывной дуги и время её горения.

Исследования стабильности горения сварочной дуги проводились согласно методике К. К. Хренова, основанной на определении среднего значения длины дуги в момент обрыва при многократном повторении одного и того же эксперимента. При этом использовали компьютер с установленной в нем платой аналого-цифрового преобразователя, который позволил определить длительность горения дуги после зажигания до разрыва. Результаты испытаний УОНИ 13/55 и экспериментальных электродов по длине разрывной дуги и времени её горения, значения показателей которых взяты как среднее значение по пяти замерам, представлены на рис. 1.

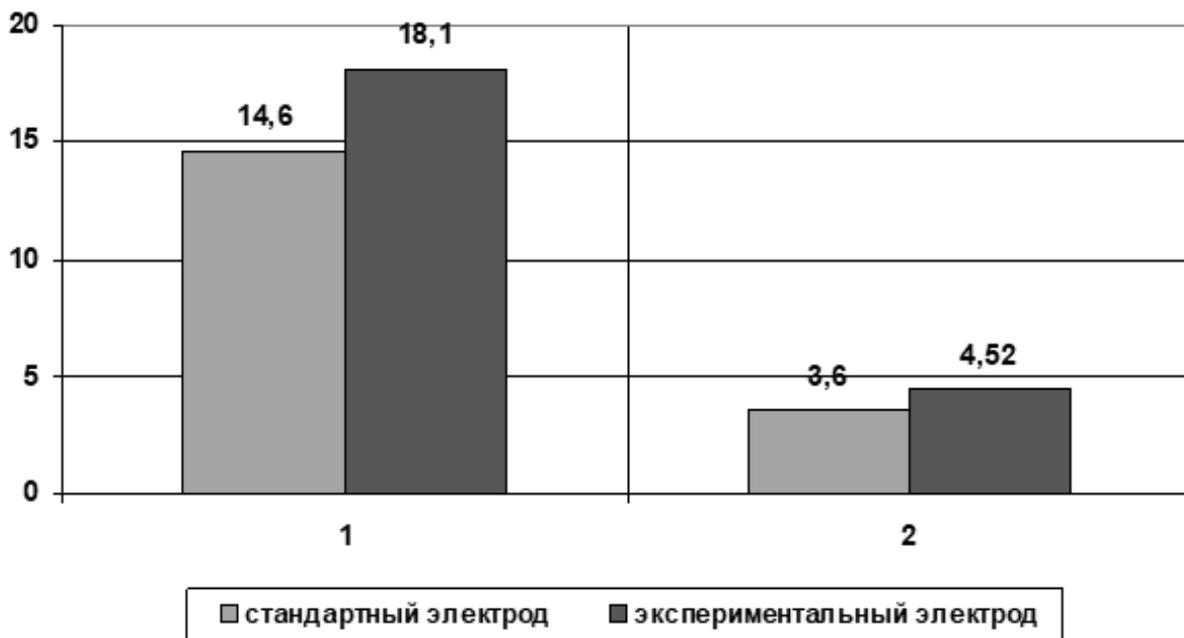


Рис. 1. Изменение длины разрывной дуги и времени горения до ее обрыва стандартным и экспериментальным электродами марки УОНИ-13/55: 1 – длина разрывной дуги, мм; 2 – время горения дуги, с

Сравнительный анализ испытаний электродов показал, что модифицирующая добавка позволила увеличить длину разрывной дуги и продолжительность горения соответственно на 24 %...26 % и 25 %...27 %.

Механические свойства металла шва на статическое растяжение выполняли на образцах, изготовленных по ГОСТ 6996–66. Механическим испытаниям подвергались контрольные сварные соединения пластин тип соединения

С17 ГОСТ 5264–80 из стали марки 09Г2С, заваренные стандартными и экспериментальными электродами диаметром 3,0 мм. Образцы для механических испытаний типа II по ГОСТ 6996–66 вырезали из металла шва контрольных сварных соединений. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты испытаний металла шва на статическое растяжение

Образец	Среднее значение по десяти образцам			
	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
УОНИ 13/55	550,0	430,0	22,3	59,7
Экспериментальный электрод	555,0	438,0	28,1	67,5

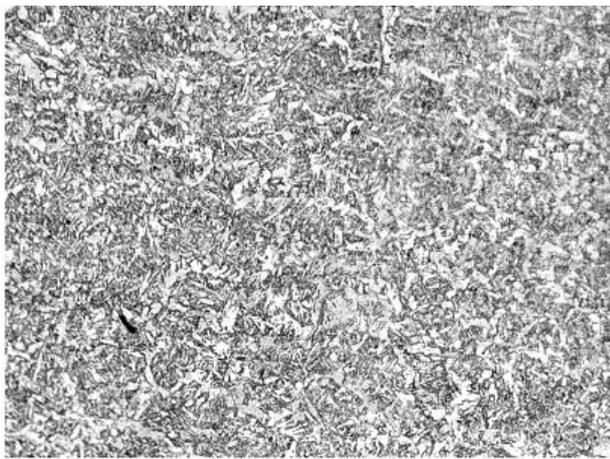
На основании результатов испытаний на статическое растяжение металла шва можно сделать следующие выводы: временное сопротивление σ_b металла швов, полученных УОНИ 13/55 и экспериментальными электродами, имеют близкие значения, а предел текучести σ_T и относительное удлинение δ выше у металла шва, полученного экспериментальными электродами.

На рис. 2 представлены микрофотографии структур металла сварных швов, полученных УОНИ 13/55 и экспериментальными электродами при увеличении 1000х.

Исследование структур металла шва показал, что микроструктура металла верхнего валика, полученного стандартным электродом, характеризуется крупными столбчатыми кристаллами, по границам которых расположен полигональный феррит, к которому местами примыкает видманштеттовский феррит. Внутри зерен видны небольшие площадки видманштеттового феррита, а также наблюдается игольчатый феррит. Микроструктура такого же валика, выполненного экспериментальным электродом, также имеет столбчатые кристаллы, направленные вдоль теплоотода, но при этом их поперечный размер в 4–5 раз меньше. Вокруг зерен отсутствует сплошная ферритная сетка. Внутри зерен видны включения полигонального и игольчатого феррита.

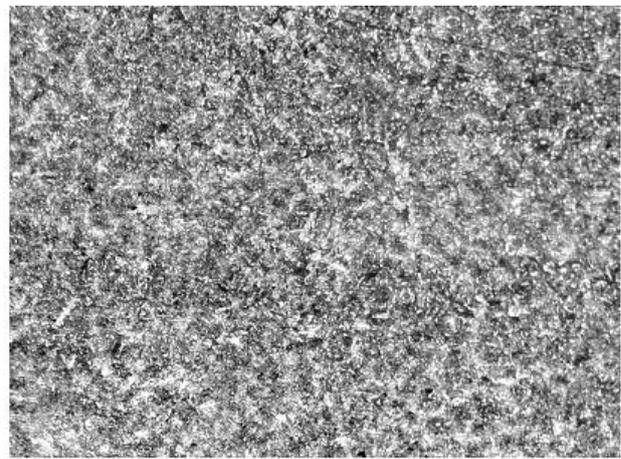
Корень шва характеризуется равноосными зернами, т. к. металл претерпевает полную перекристаллизацию за счет теплового воздействия заполняющих слоев. При этом размер зерен металла корня шва, полученного экспериментальными электродами, в 3–4 раза меньше зерен шва, полученного стандартными электродами.

Таким образом, применение модификатора в составе шихты покрытия позволило получить мелкозернистую структуру металла шва, что не могло не сказаться на улучшении механических свойств, особенно на повышении пластичности.



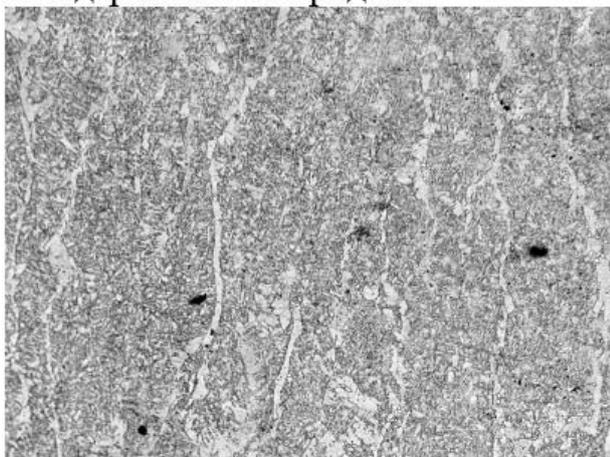
—100 мкм—

Корень шва, полученный стандартным электродом



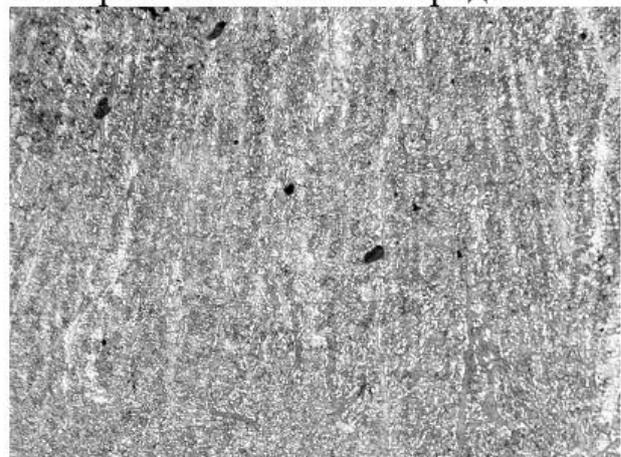
—100 мкм—

Корень шва, полученный экспериментальным электродом



—100 мкм—

Верхний заполняющий проход, полученный стандартным электродом



—100 мкм—

Верхний заполняющий проход, полученный экспериментальным электродом

Рис. 2. Структуры металла шва при увеличении 1000х

Проведенные исследования показали, что модификатор, введенный в шихту покрытия и представляющий собой смесь ультрадисперсных частиц, в состав которых входят щелочно-земельные металлы в виде карбонатов, позволил повысить стабильность горения дуги при сварке электродом УОНИ 13/55 и пластичность металла шва за счет измельчения его структуры.

E-mail: urbanovichbntu@tut.by; juki6667@yandex.ru; benedikt082@gmail.com.

УДК 55.09.43

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫЕ ПОРОШКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ПОСЛОЙНЫМ СИНТЕЗОМ

А. С. ФЕДОСЕНКО, Ф. Г. ЛОВШЕНКО

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 55.09.43

COMPOSITE MECHANICALLY ALLOYED POWDERS FOR DEPOSITION OF GAS THERMAL COATINGS AND PRODUCTION OF PRODUCTS BY LAYERED SYNTHESIS

A. S. FEDOSENKO, F. G. LOVSHENKO

Аннотация. Установлены закономерности формирования порошков на основе железа и никеля, получаемых методом реакционного механического легирования и предназначенных для нанесения газотермических покрытий, а также изготовления изделий послойным синтезом. Исследованы структура, фазовый состав и свойства синтезируемых порошков, а также материалов, получаемых из них.

Ключевые слова: аддитивные технологии, механически легированные порошки, фазовый состав, структура, твердость, жаропрочность, плазменные покрытия.

Abstract. Regularities have been established for the formation of powders based on iron and nickel, obtained by the method of reactive mechanical alloying and intended for the deposition of thermal coatings, as well as the manufacture of products by layer-by-layer synthesis. The structure, phase composition and properties of synthesized powders, as well as materials obtained from them, have been studied.

Keywords: additive technologies, mechanically alloyed powders, phase composition, structure, hardness, heat resistance, plasma coatings.

Введение. Способы формирования трехмерных объектов посредством послойного нанесения конструкционного материала являются одними из передовых и образуют новую отрасль науки. В промышленности широкое распространение получили такие способы послойного синтеза, как селективное лазерное сплавление, селективное лазерное спекание, лазерная наплавка с непосредственной подачей порошка в зону построения. Также ведутся работы, направленные на адаптацию способов газотермического напыления и плазменной наплавки для получения трехмерных изделий. Общей характеристикой перечисленных технологий является использование в качестве исходного материала порошка. При этом, как отмечают исследователи, получаемые изделия из серийно выпускаемых материалов зачастую не обеспечивают требуемых свойств. По этой причине остро стоит вопрос разработки новых материалов, применение которых обеспечивает достижение необходимого уровня физико-механических свойств формируемых изделий. К таким способам можно отнести реакционное механическое легирование [1–3], позволяющее синтезировать

материалы широкого химического состава на основе железа, никеля и других металлов, широко используемых в промышленности.

В работе приведены результаты исследований, направленные на получение механически легированных порошков на основе металлов, а также рассмотрены структура и свойства изделий, формируемых из них.

Методика проведения эксперимента. Исследования выполнялись на железных и никелевых композициях. В качестве исходных компонентов использовали серийно выпускаемые порошки железа ПЖРВ-2, никеля ПНК-ОНТ2, алюминия ПА4, сплав ПХ30. В качестве поставщика кислорода, необходимого для формирования упрочняющей фазы в виде оксида алюминия Al_2O_3 использовали оксиды железа Fe_2O_3 , молибдена MoO_3 , никеля NiO .

Механосинтез проводили в гирационной вибрационной мельнице с объемом рабочих камер 1 дм^3 каждая. Отжиг порошков проводили в трубной печи СНОЛ 1200.

Для плазменного напыления использовали дуговой плазмотрон, работающий на воздушно-пропановой смеси. Потребляемая мощность составляла 40...45 кВт, скорость плазменного потока дозвуковая, расход порошка – 6 кг/ч.

Селективное лазерное сплавление проводили на 3D-принтере EP-M250. Толщина слоя наплавляемого материала составляла 30 мкм. В качестве защитной среды использовался аргон. Исследования проводили на сталях аустенитного класса марки 316 L и полученной реакционным механическим легированием 12X18H10.

Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре «ДРОН-3» с применением монохроматизированного $Si_{K\alpha}$ -излучения. Параметры тонкой структуры рассчитывали с помощью программы ГАРФЛ.

Результаты исследований.

1. Механическое легирование.

Влияние режимов механосинтеза на свойства порошков.

На первой стадии экспериментов изучали влияние основных переменных факторов технологического процесса механического легирования на гранулометрический состав материалов и твердость частиц. Установлено, что для всех порошков исследованных композиций, предназначенных для газотермического напыления и послойного синтеза, значения переменных факторов примерно одинаковы и составляют: ускорение рабочих элементов – $135...145 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$; соотношение рабочих элементов к количеству обрабатываемого порошка – 10–12; время обработки – 8...10 ч; заполнение камеры рабочими телами – 75 %...80 %. Исходя из этого в дальнейшем исследования в основном проводились на порошках, синтезированных при следующих значениях переменных факторов: $\tau = 8 \text{ ч}$, $\varepsilon = 75 \%$, $k = 10$, $a_n = 145 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$.

Кинетика формирования частиц механически легированных порошков.

Установлено, что на первом этапе обработки, длительность которого ориентировочно составляет 2 ч, наибольшее развитие получают процессы пластической деформации, упрочнения и дробления исходных компонентов. Измельчение способствует появлению свежих неокисленных участков, и частицы начинают объединяться по ювенильным поверхностям, одновременно

на границе контакта между отдельными компонентами протекают процессы взаимодействия, сопровождающиеся образованием твердых растворов и других механически синтезированных фаз. Благодаря большой площади активной поверхности процесс грануляции начинает превалировать над измельчением, в результате чего спустя 6...8 ч формируется материал определенного гранулометрического состава.

Анализ разработанных порошков показал, что доля частиц с размером от 25 до 100 мкм, наиболее пригодных для использования в области газотермического напыления, послойного синтеза, а также плазменной наплавки, составляет более 65 %. Частицы имеют правильную форму (рис. 1), которая обеспечивает материалам хорошую сыпучесть, что подтверждается небольшим значением угла естественного откоса свободно насыпанных порошков, величина которого в среднем составляет 35°.

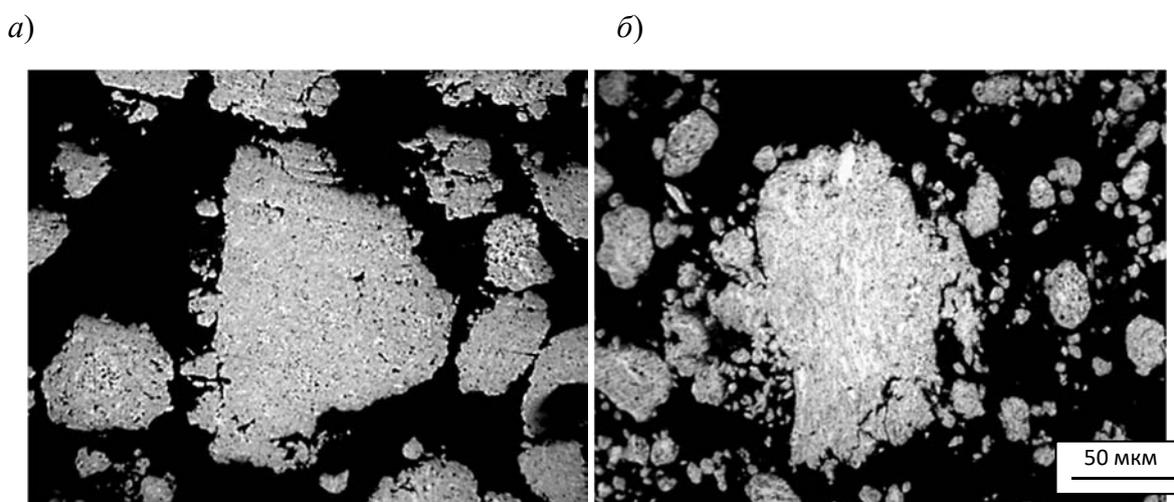


Рис. 1. Форма и размер гранул механически легированных композиций на основе железа: а – H90Ю10 – Ni₂O₃; б – 12X18H10 – Fe₂O₃

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что по основным характеристикам, включая гранулометрический состав, сыпучесть и форму частиц, синтезируемые механически легированные порошки на основе железа и никеля соответствуют предъявляемым к ним требованиям.

Порошки отличаются химической однородностью на субмикроструктурном уровне и высокой твердостью в широком температурном интервале (табл. 1).

Табл. 1. Твердость многокомпонентных композиционных порошков на основе металлов

Легировующий компонент, %	Твердость HV после		Твердость аналога HV после отжига (900 °С, 2 ч)
	механического легирования	механического легирования и отжига (900 °С, 2 ч)	
<i>Порошки на основе железа</i>			
40X13	660	440	170
95X18	740	515	229
ЖА30	470	420	–
ЖА30 – 9 % Al ₂ O ₃	580	560	–
12X18H10	540	360	185

Как видно (см. табл. 1), твердость синтезируемых порошков после отжига при 900 °С до 2,5 раза выше твердости серийно выпускаемых материалов.

2. Многослойные покрытия, полученные газотермическим плазменным напылением.

Покрытия из разработанных порошков имеют классическое строение [1–3]. Они образованы послойным наложением расплавленных частиц, деформирующихся при ударе о подложку и образующих плотно уложенные друг на друга пластины. Их толщина достигает 5 мкм, а длина 30 мкм. Покрытия характеризуются отсутствием трещин, пор и пустот. Пористость их, как правило, не превышает 3 % (рис. 2). Сохраняется гомогенное распределение компонентов.

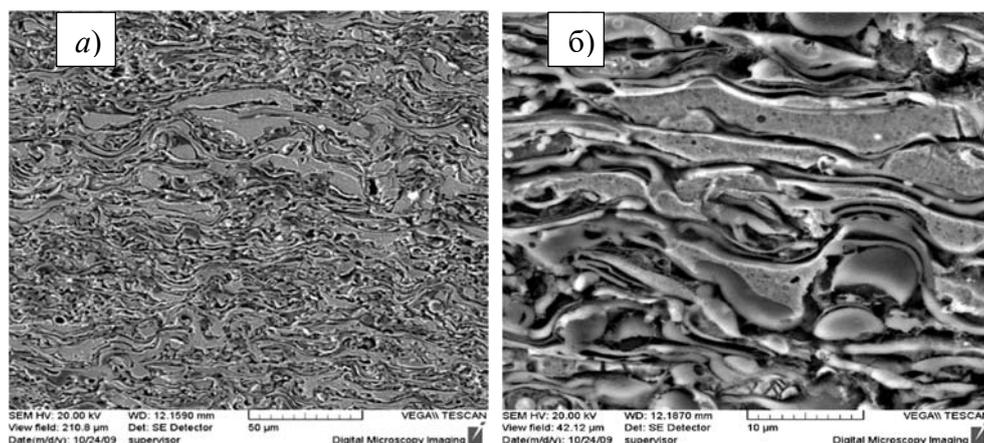


Рис. 2. Микроструктура (СЭМ) покрытия Н90Ю10 – Ni₂O₃ (СЭМ)

Быстрая кристаллизация расплавленных частиц в процессе напыления способствует формированию слоя напыляемого материала, имеющего размер зерен основы не более 300 нм, разделенных на блоки величиной не более 100 нм, по границам которых равномерно распределены упрочняющие наноразмерные стабильные фазы интерметаллидов, карбидов и оксидов, величиной не более 30 нм. Это косвенно подтверждается высокой жаропрочностью напыленных слоев.

Получаемые покрытия отличаются неравновесным фазовым составом (табл. 2).

Табл. 2. Фазовый состав плазменных покрытий

Обозначение	Фазовый состав покрытий		
	равновесный	из механически легированных порошков	из отожженных порошков
40X13	$\text{Fe}_\alpha(\text{Cr}), \text{Cr}_7\text{C}_3$	$\text{Fe}_\alpha, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}, \text{FeC}, \text{CrC}$	$\text{Fe}_\alpha, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}, \text{FeC}, \text{CrC}$
12X18H10	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}), \text{Cr}_7\text{C}_3$	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}), \text{FeCr}_2\text{O}_4, \text{NiAlO}_2, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{FeO}, \text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{Fe}_\gamma(\text{Cr}, \text{Ni}), \text{FeCr}_2\text{O}_4, \text{NiAlO}_2, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{FeO}, \text{Fe}_3\text{O}_4$
ПН90Ю10-ДУ 2(6)	$\text{Ni}(\text{Al}), \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Al}_4\text{C}_3$	$\text{Ni}(\text{Al}), \text{Ni}_3\text{Al}, \text{Al}, \text{Ni}_2\text{O}_3, \text{NiO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ni}(\text{Al}), \text{Ni}_3\text{Al}, \text{Ni}_2\text{O}_3, \text{NiO}, \text{Al}_2\text{O}_3$

Исследования показали, что твердость и износостойкость покрытий из разработанных порошков до 70 % выше по сравнению с покрытиями из серийно выпускаемых материалов.

3. Материалы, полученные послойной печатью методом селективного лазерного сплавления (СЛС).

Аналогично газотермическим покрытиям в образцах, полученных селективным лазерным сплавлением, механически легированные порошки проявляют модифицирующий эффект, что подтверждается исследованиями микроструктуры. Изучение поперечного сечения микрошлифов позволило установить, что структура материала, сформированного из серийно выпускаемого порошка, состоит из крупных дендритов, вытянутых в направлении, перпендикулярном плоскости модельной плиты. Их размер в поперечном сечении – 80...160 мкм (рис. 3, а). В продольном направлении их протяженность достигает 5 мм, что соответствует общей высоте исследуемых образцов в поперечном сечении.

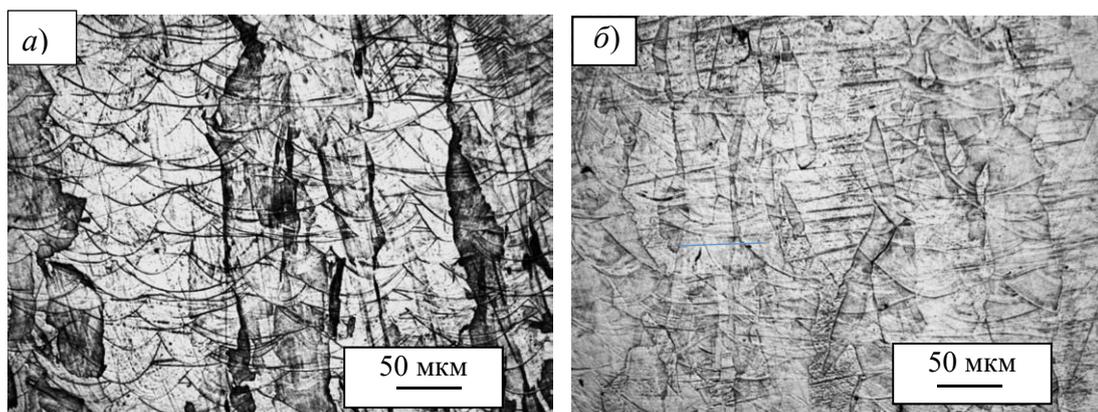


Рис. 3. Структура образцов из серийно выпускаемого порошка марки 316 L и разработанного 12X18H10 в поперечном сечении

Применение разработанных порошков позволило сформировать материал, в структуре которого сквозные столбчатые зерна отсутствуют либо состоят из отдельных фрагментов, разориентированных относительно друг друга на углы более 5° (рис. 3, б). Таким образом, основу материалов из механически легированных порошков составляют зерна, имеющие границы с четырех сторон и вытянутые в направлении, перпендикулярном плоскости модельной плиты. Их поперечное сечение до 2 раз меньше в сравнении с зернами образцов из серийно выпускаемого материала.

Установлено, что как в исходном состоянии, так и после отжига исследуемые стали существенно отличаются по твердости. При этом ее значение всегда выше у образцов из разработанной стали 12X18H10. Особенностью данного материала также является высокая стойкость против отжига (рис. 4).

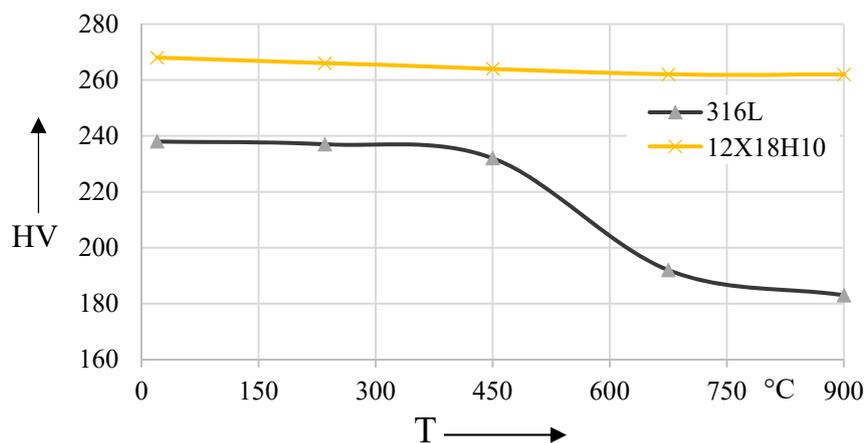


Рис. 4. Влияние температуры отжига на твердость сталей 12X18H10 и 316L

Заклучение. Представленные результаты исследований, полученные на материалах выбранных композиций, являются базой для разработки механически легированных порошков широкого химического состава на основе железа и никеля для нанесения высокостойких газотермических покрытий, а также производства изделий послойным синтезом, отличающихся повышенными физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками по сравнению с изделиями, получаемыми из серийно выпускаемых порошков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.
2. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов: монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2016. – 420 с.: ил.
3. **Ловшенко, Ф. Г.** Механически легированные жаропрочные порошки для производства изделий аддитивными технологиями : монография / Ф. Г. Ловшенко, А. С. Федосенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2019. – 405 с.: ил.

E-mail: 5trannik@tut.by; Lovshenko2014@yandex.ru.

УДК 621.791.763.2

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОДА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПРИ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ

С. М. ФУРМАНОВ, Д. Н. ЮМАНОВ, А. О. СЕРГЕЙЧИК, Р. А. ЕРМОЛЕНКО

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791.763.2

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE CODE OF THE ADAPTIVE POWER REGULATION SYSTEM FOR PROJECTION WELDING

S. M. FURMANOV, D. N. YUMANOV, A. O. SERGEYCHIK, R. A. ERMOLENKO

Аннотация. Предложенный способ программного адаптивного управления мощностью контактной рельефной сварки позволяет исключить появление выплесков расплавленного металла и достичь стабильно высоких механических свойств формируемых сварных соединений без прерывания технологического цикла за счет оптимизации ввода электрической энергии в каждом полупериоде сетевого напряжения с помощью корректирующей системы регулирования мощности, что достигается использованием величины перемещения подвижного электрода при подогреве для определения требуемой степени деформации рельефа как условия для начала нарастания мощности сварки до максимальной и контролем при этом скорости перемещения подвижного электрода.

Ключевые слова: программное адаптивное управление, контактная рельефная сварка, механические свойства сварных соединений, перемещение подвижного электрода, технологический цикл сварки.

Abstract. The proposed method of software adaptive power control of projection welding makes it possible to exclude the appearance of splashes of molten metal and to achieve stably high mechanical properties of the formed welded joints without interrupting the technological cycle due to the optimization of the input of electrical energy in each half-cycle of the mains voltage with the help of a corrective power regulation system, which is achieved using the movement of the movable electrode during heating to determine the required degree of deformation of the relief as a condition for the beginning of the increase in welding power to the maximum and control at the same time of the movement speed of the movable electrode.

Keywords: software adaptive control, projection welding, mechanical properties of welded joints, movement of the movable electrode, technological cycle of welding.

Оптимизация параметров режима контактной рельефной сварки определенного типа сварных соединений предполагает разработку новых способов сварки, циклограммы которых более полно показывают характер протекания процесса. Задачей разработки нового способа рельефной сварки с программным адаптивным регулированием мощности является стабилизация механических свойств соединений выше допустимого уровня непосредственно в ходе протекания процесса сварки при использовании обратных связей по мощности, перемещению и скорости перемещения подвижного электрода.

Способ адаптивного управления с коррекцией мощности тепловложения обеспечивает поддержание параметров режима в соответствии с заданием в режиме реального времени [1, 2]. На циклограмме способа (рис. 1) отображается мощность тепловложения P , усилие сжатия F и перемещение верхнего подвижного электрода сварочной машины $h_{эл}$ на разных этапах протекания процесса сварки. Сигнал с датчика перемещений $h_{эл}$ и его производная – скорость перемещения $V_{эл}$ – используются в качестве обратной связи.

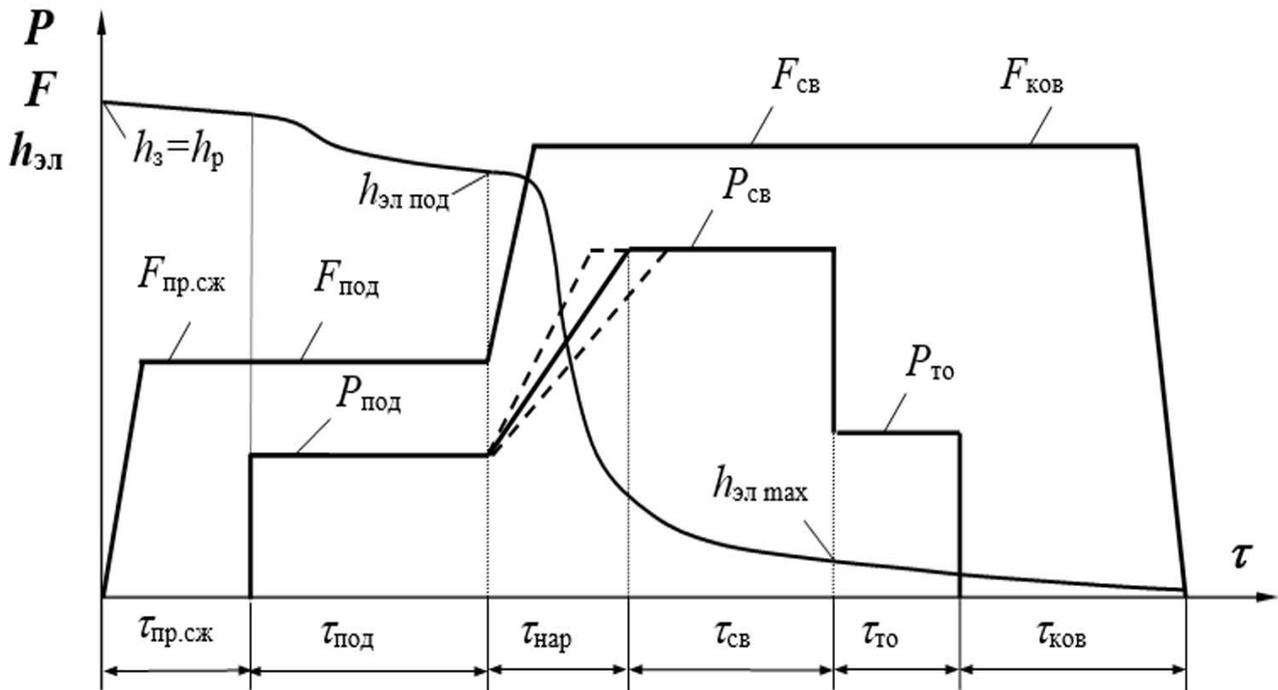


Рис. 1. Циклограмма рельефной сварки с адаптивным регулированием мощности

В ходе протекания процесса сварки периодически в каждом полупериоде сетевого напряжения измеряются мгновенные значения напряжения межэлектродной зоны $u_{ээ}$, вторичного сварочного тока i_2 и перемещение верхнего электрода $h_{эл}$, на основании этих данных рассчитываются действующие значения напряжения $U_{ээ}$, тока I_2 и мощности P_2 , энергия $Q_{ээ}$ и скорость перемещения $V_{эл}$.

Начальная точка отсчета величины перемещения $h_{эл}$ выбирается после приложения к электродам предварительного усилия сжатия $F_{пр.сж}$, текущее положение датчика перемещения при запуске измерения является нулевым.

При включении тока подогрева $I_{под}$ действует коррекция мощности. В течение каждого полупериода сетевого напряжения происходит измерение параметров режима за интервалы времени $\tau_{изм\ n}$, $\tau_{изм\ n+1}$, $\tau_{изм\ n+2}$ и т. д. (рис. 2) [2].

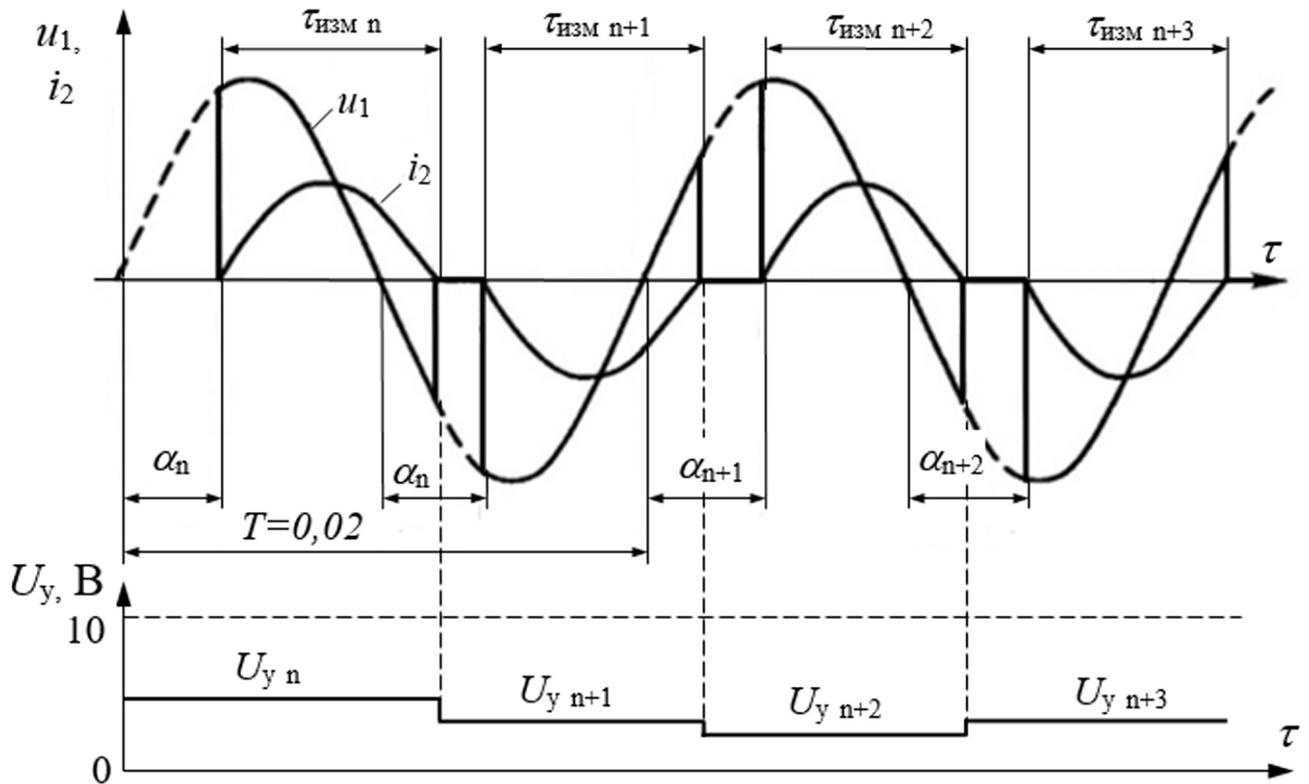


Рис. 2. Интервалы времени измерения параметров режима и расчета управляющего воздействия при коррекции мощности в адаптивной системе

В n -м положительном полупериоде протекания сварочного тока i_2 задаются напряжение управления $U_{y n}$ и начальная фаза включения тиристоров α_n , при этом за время $\tau_{\text{изм } n}$ на основании измеренных параметров производится расчет напряжения управления $U_{y n+1}$ для $(n+1)$ -го полупериода и фазы α_{n+1} . Однако фаза включения α_{n+1} меняется только в $(n+2)$ -м полупериоде. Поэтому коррекция мощности действует через один полупериод: например, после времени $\tau_{\text{изм } n+1}$ напряжение $U_{y n+2}$ меняет фазу α_{n+2} в $(n+3)$ -м полупериоде. После времени $\tau_{\text{изм } n+2}$ формируется напряжение управления $U_{y n+3}$.

Степень разогрева контактов на стадии подогрева зависит от мощности $P_{\text{под}}$ и усилия $F_{\text{под}}$, при этом уменьшение усилия $F_{\text{под}}$ позволяет снизить подводимую мощность $P_{\text{под}}$ для обеспечения требуемой степени разогрева и деформации рельефа (см. рис. 1). Величина $h_{\text{эл под}}$ перемещения электрода при подогреве используется для определения начала нарастания мощности сварки и усилия сжатия до максимальных значений.

Время нарастания мощности $\tau_{\text{нар}}$ контролируется и изменяется в зависимости от скорости перемещения электрода $V_{\text{эл}}$. Время $\tau_{\text{нар}}$ должно учитывать инерцию нарастания усилия сжатия электродов до максимального значения $F_{\text{св}}$, необходимого для введения в зону соединения мощности $P_{\text{св}}$. Плавное нарастание мощности от подогрева $P_{\text{под}}$ к сварке $P_{\text{св}}$ позволяет исключить бросок намагничивающего тока трансформатора и появление выплесков расплавленного металла.

В ходе протекания тока в течение времени $\tau_{\text{св}}$ максимальное перемещение электрода $h_{\text{эл max}}$ не должно стать равным величине зазора h_z для предотвращения шунтирования тока при резком увеличении площади контакта между свариваемыми деталями, снижения плотности тока и образования непровара. При соблюдении условия $h_{\text{эл max}} < h_z$ возможна эффективная проковка соединения повышенным усилием $F_{\text{ков}}$ в течение времени $\tau_{\text{ков}}$, ведущая к снижению остаточных растягивающих напряжений и росту усилия на отрыв соединений при механических испытаниях. Достижение перемещения электрода $h_{\text{эл max}}$ является сигналом перехода от сварки к термообработке мощностью $P_{\text{то}}$, которая осуществляется за время $\tau_{\text{то}}$. Термообработка может отсутствовать.

Функциональная схема программного кода адаптивной системы регулирования мощности при рельефной сварке представлена на рис. 3.

Запуск программы осуществляется нажатием на сдвоенную педаль пуска SB1, SB2 машины контактной сварки. Цифровой триггер PFI 0 (разъем J1_DIO) запускает цикл сварки и отсчет интервалов времени предварительного сжатия, протекания тока, проковки, паузы. Через блок питания и согласования напряжений БПСН подключаются катушки электропневмоклапанов сжатия и проковки (ЭПК 1 и ЭПК 2). Для включения тока используется цифровой триггер PFI 1 (разъем J1_DIO). Напряжение управления U_{γ} для тиристорного регулятора ТРМ-1М задает фазу открытия тиристорov α [3, 4].

Тиристорный регулятор ТРМ-1М открывает тиристоры с начальной фазой $\alpha_n = \alpha_{\text{max}}$ и подключает к сети сварочный трансформатор ТС, во вторичной цепи которого начинает протекать ток подогрева. Сетевое напряжение u_1 измеряется трансформатором TV2 (аналоговый вход AI 0–AI GND, разъем J2_AI), напряжение между электродами зоны $u_{\text{эз}}$ (дифференциальный аналоговый вход AI 2–AI 10 DIFF) и сварочный ток i_2 (дифференциальный аналоговый вход AI 3–AI 11) – соответствующими датчиками напряжения и тока.

Действующие значения RMS параметров U_1 , $U_{\text{эз}}$, I_2 рассчитываются программно. Мощность сварки в текущем полупериоде рассчитывается по формуле $P_2 = U_{\text{эз}} \cdot I_2$, энергия $Q_{\text{эз}}$ определяется интегрированием мощности P_2 .

Детектор включения тиристорov формирует прямоугольный сигнал для счетчика ctr1 PFI4 (J4_DIO), измеряющего ширину импульса λ (CI Pulse Width).

Далее по аппроксимирующим зависимостям определяются коэффициент мощности $\cos\varphi = f(\alpha_n, \lambda)$ сварочной машины, коэффициент регулирования мощности $k_{SA} = f(\alpha_n, \cos\varphi)$ и полнофазная мощность $P_{2\text{п}} = P_2 / k_{SA}$ [1, 2].

NI_6251 USB

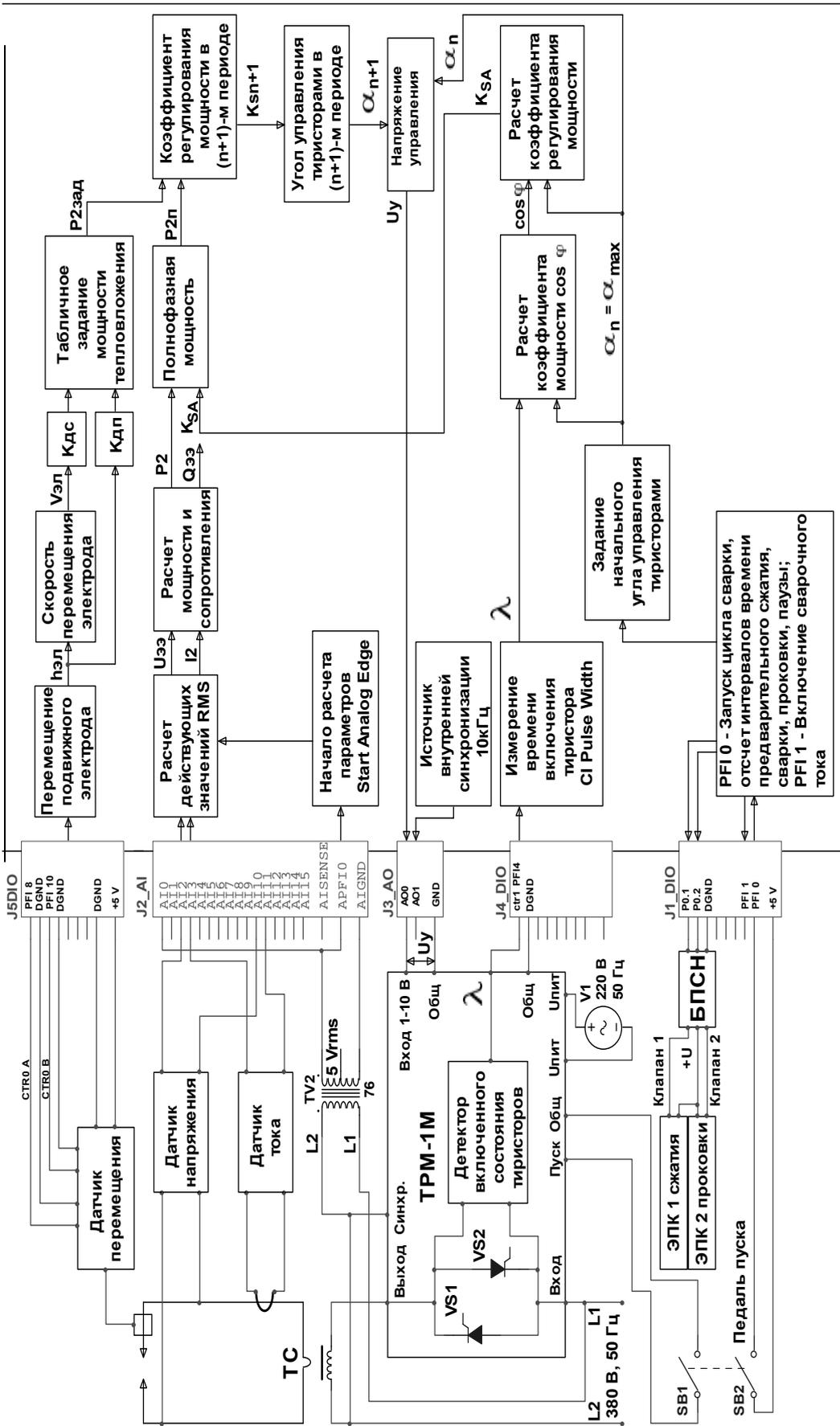


Рис. 3. Функциональная схема программы адаптивной системы регулирования мощности при рельефной сварке

Задание циклограммы мощности $P_{2\text{зад}}$ осуществляется в каждом полупериоде сетевого напряжения с интервалом 10 мс.

Коэффициент регулирования мощности k_{Sn+1} определяется из соотношения $k_{Sn+1} = P_{2\text{зад}} / P_{2\text{п}}$. Если известен k_{Sn+1} , можно определить фазу α_{n+1} в следующем полупериоде и напряжение управления U_{yn+1} для тиристорного регулятора мощности ТРМ-1М на аналоговом выходе АО 0–GND (разъем J3_АО).

Кроме того, в системе адаптивного регулирования происходит коррекция мощности $P_{2\text{зад}}$ в зависимости от измеренных в текущем полупериоде характеристик перемещений подвижного электрода.

На основании измеренного усилия $F_{\text{под}}$ корректируется заданная мощность $P_{2\text{зад}}$ введением коэффициента датчика перемещения $K_{\text{дп}}$, т. е. $P_{2\text{зад}} = K_{\text{дп}} \cdot P_{\text{под}}$. При этом величины перемещений за время подогрева $\tau_{\text{под}}$ должны соответствовать среднему значению диапазона 80...260 мкОм при оптимальном токе подогрева $I_{\text{под}}$ (см. рис. 3).

Для коррекции времени нарастания мощности $\tau_{\text{нар}}$ от подогрева к сварке используется коэффициент датчика скорости $K_{\text{дс}}$ перемещения электрода, воздействующий на задание мощности $P_{2\text{зад}}$ в режиме реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фурманов, С. М.** Пути совершенствования термомеханических циклов контактной точечной и рельефной сварки: монография / С. М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – 274 с.

2. Способ контактной рельефной сварки с адаптивным управлением: пат. ВУ 23482 / С. М. Фурманов, Д. Н. Юманов, И. Н. Смоляр, И. А. Наумовец, Г. А. Ларионов. – Опубл. 30.08.2021.

3. Компьютерное управление процессом контактной сварки с помощью среды графического программирования LabView / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 54–62.

4. Аппаратная реализация корректирующей системы регулирования мощности тепловложения при контактной рельефной сварке / С. М. Фурманов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2018. – № 5. – С. 35–40.

E-mail: pochta_furm@mail.ru; oitsp.dmitriy.y@gmail.com; ermolenko1995@gmail.com; sergei4ix@gmail.com.

УДК 681.5.015

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ СКИФ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

О. П. ЧИЖ, С. В. МЕДВЕДЕВ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

UDC 681.5.015

SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESULTS OF SKIF SUPERCOMPUTER PROGRAMS OF THE UNION STATE FOR THE TECHNICAL PREPARATION OF ASSEMBLY AND WELDING INDUSTRIES

O. P. TCHIJ, S. V. MEDVEDEV

Аннотация. Отмечена роль высокопроизводительных вычислений в обеспечении конкурентоспособности выпускаемой продукции, созданы и апробированы образцы кластерных вычислительных систем, объединенные в грид-сети; на полученных программно-методических и технических средствах возможно эффективное решение основных задач технической подготовки сборочно-сварочных производств и подготовки инженерных кадров нового поколения.

Ключевые слова: Союзное государство, научно-технические программы СКИФ, высокопроизводительные суперкомпьютерные установки параллельной архитектуры, грид-сети, прикладное программное обеспечение конечно-элементного анализа, специфика сборочно-сварочных объектов и технологий.

Abstract. The role of high-performance computing in ensuring the competitiveness of manufactured products is noted, samples of cluster computing systems united in grid networks are created and tested; on the obtained software, methodological and technical means, it is possible to effectively solve the main tasks of the technical training of assembly and welding industries and the training of engineering personnel of a new generation.

Keywords: Union State, scientific and technical programs of SKIF, high-performance supercomputer installations of parallel architecture, grid networks, application software for finite element analysis, specifics of assembly and welding facilities and technologies.

Постоянно возрастающая конкуренция на мировых рынках заставляет их участников искать новые средства и методы конкурентной борьбы. Так, по мнению Деборы Винс-Смит, президента Совета по конкурентоспособности США, «технологии, таланты и деньги сейчас доступны многим странам по всему миру, США сталкивается с беспрецедентной иностранной экономической конкуренцией. Страна, желающая победить в конкуренции, должна победить в вычислениях» (With technology, talent and capital now available globally, the U.S is facing unprecedented economic competition from abroad. The country that wants to out complete must out-compute).

В связи с хроническим отставанием Союзного государства в технологиях высокопроизводительных вычислений в начале 2000-х гг. принято решение о разработке и реализации ряда научно-технических программ указанного направления:

- СКИФ – 2000–2004 гг.;
- СКИФ-ТРИАДА – 2005–2008 гг.;
- СКИФ-ГРИД – 2007–2010 гг.;
- СКИФ-НЕДРА – 2015–2018 гг. (рис. 1).

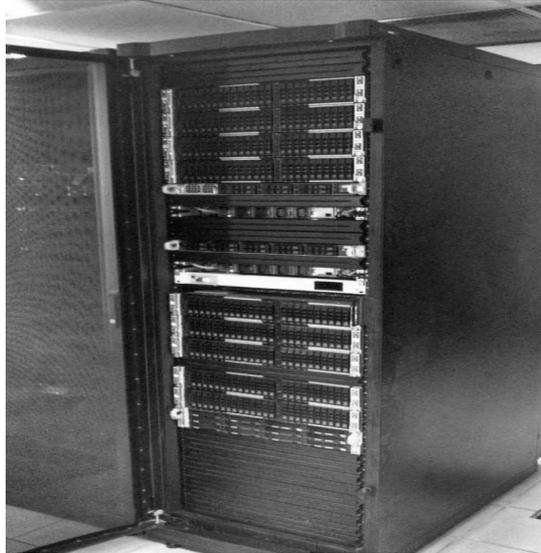


Рис. 1. Белорусский кластер СКИФ-ГЕО-ЦОД

Идеи и научно-технический задел программ СКИФ подхвачен и развит в рамках Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств-участников СНГ на период до 2020 года в рамках проекта «Развитие инфраструктуры суперкомпьютерных центров в интересах инновационного развития государств-участников СНГ» (рис. 2).



Рис. 2. Белорусский кластер СКИФ-ГРИД-СНГ-Офис

Главные результаты успешной реализации программ СКИФ – создание серии суперкомпьютерных высокопроизводительных конфигураций [1], которые входили в список top-500 самых производительных установок в мире, поставка персонального кластера в КНР и формирование предпосылок для эффективного применения супервычислителей для решения задач реального сектора экономики, в том числе и сборочно-сварочных производств [2–5].

Возрождение суперкомпьютерной отрасли в Союзном государстве и эффективная реализация СКИФовских научно-технических программ заставила США снять эмбарго на поставку суперЭВМ в Россию в начале 2000-х гг.

В интересах машиностроительного комплекса Республики Беларусь создана и апробирована грид-сеть (рис. 3) с выделенными сегментами под управлением программного обеспечения промежуточного уровня UNICORE (рис. 4), которая может устанавливаться на пользовательские компьютеры для запуска расчетных задач на любом из суперкомпьютеров грид-сегмента (рис. 5).



Рис. 3. Структура грид-среды машиностроительной направленности

Общая структура грид-сегмента Unicore

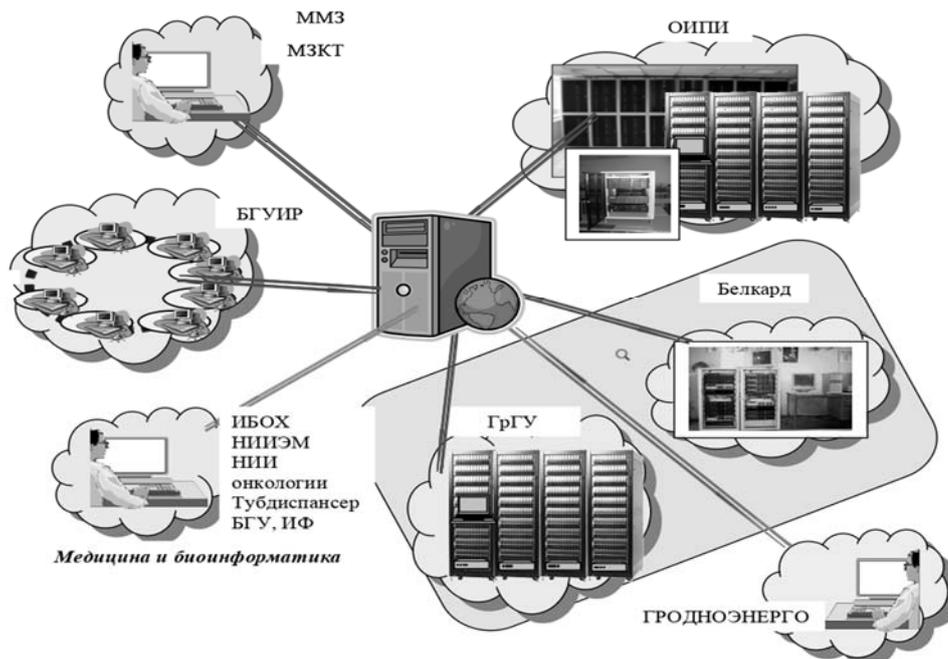


Рис. 4. Структура грид-сегмента UNICORE внутри машиностроительной грид-среды

The screenshot shows the UNICORE Grid Browser interface. The left pane displays a tree view of the grid structure, including SKIF_GEO_OFFICE and SKIF_GPU_NEXT. The right pane shows a script editor with a shell script for job submission. The bottom pane shows a table of job details.

Key	Value
Installed Applications	Perl (Version 5.26.2) Bash shell (Version 4.4.23) C shell (Version 6.20) Python
Name	SKIF_GEO_OFFICE_TargetSystem
Number of nodes	9
State	Ready
Processor main memory	32000 Megabyte
CurrentTime	2019-10-08 10:06:50
Type	TargetSystemService
Processor architecture	x86_64
Processors per node	4

Рис. 5. Экран программной среды UNICORE на клиентской части грид-сети

СКИФ-кластеры (стационарные и офисные) входят в состав Национальной научно-образовательной грид-сети Республики Беларусь, внутри которой возможно построение проблемно ориентированных научно-образовательных и инженерных грид-сегментов, в том числе и сборочно-сварочной направленности [4].

Заинтересованные структуры и организации имеют возможность заказать в ОИПИ НАН Беларуси разработку, сборку и отладку СКИФ-кластера предварительно согласованной архитектуры и технических возможностей.

Технические характеристики СКИФ-ГЕО-ЦОД:

- 36 узлов;
- LinuxFedoraх86_64;
- два 18-ядерных процессора Intel Xeon Gold 6140 (2,30 GHz , MaxTURBO Frequency 3,70 GHz ;
- 192 GB ОЗУ;
- междузловая связь Infiniband EDR.

Технические характеристики СКИФ-ГРИД-СНГ-Офис:

- LinuxFedoraх86_64;
- процессоры Intel Core (i5,i7) CPU;
- видеоадаптер Intel Graphics;
- 32 GB ОЗУ;
- междузловая связь Gigabit Ethernet;
- возможность подключения внешних GPU.

В условиях санкционного давления на предприятия, учебные заведения и организации Союзного государства представляется целесообразным сосредоточиться в ближайшей перспективе на построении лицензионно независимых программно-технических средств технической подготовки и углубленного моделирования сборочно-сварочных объектов, использовании этих ресурсов для совершенствования существующих и разработки новых методов и способов соединения материалов, а также в учебном процессе профильных кафедр технических вузов.

Научно-методический и программно-технический задел, сформированный при выполнении СКИФ-программ, позволяет утверждать, что технологический прорыв в отдельно взятом регионе или предприятии возможен при масштабном использовании высокопроизводительных ресурсов, разработке новых методов конструктивно-технологического проектирования технических объектов и систем, а также подготовке студентов и специалистов нового поколения (рис. 6).



Рис. 6. Предполагаемая область существования условий для научно-технологического прорыва

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белорусские суперкомпьютеры семейства СКИФ / Н. Н. Парамонов [и др.]. – Гомель: Вечерний Гомель-Медиа, 2020. – 268 с. : ил.
2. **Медведев, С. В.** Методика компьютерных динамических испытаний сварных конструкций / С. В. Медведев, М. В. Петрушина, О. П. Чиж // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: материалы 4 Междунар. конф. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2008. – С. 117–121.
3. Информационные технологии программы Союзного государства «Триада». Основные результаты и перспективы : сб. науч. тр. / Науч. ред. С. В. Медведев, Г. М. Левин, Б. М. Розин. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – 304 с.
4. **Медведев, С. В.** Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 24–29.
5. **Medvedev, S. V.** Influence of the Residual Welding Phenomena on the Dynamic Properties of a Two-Meter Long Tube with 64 Non-Symmetrical Brackets Welded on a Helical Path / S. V. Medvedev, M. V. Petrushina, O. P. Tchij // 10th International LS-DYNA Users Conference, June 8–10, Dearborn. – Michigan USA, Livermore Software Technology Corporation, 2008. – P. 8–25 – 8–37.

E-mail: otchij@newman.bas-net.by; medv@newman.bas-net.by.

УДК 621.791

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ГРИД-СЕКМЕНТА СБОРОЧНО-СВАРОЧНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

О. П. ЧИЖ, Н. С. СЕМЕНЯК, С. В. МЕДВЕДЕВ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

UDC 621.791

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF THE SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL GRID SEGMENT ASSEMBLY AND WELDING ORIENTATION

O. P. TCHIJ, N. S. SEMENIAK, S. V. MEDVEDEV

Аннотация. Приводится описание технологических возможностей образовательного грид-сегмента по следующим направлениям: создание, управление, организация работы, набор прикладного ПО, помощь в проектировании сварных конструкций.

Ключевые слова: высокопроизводительные суперкомпьютерные установки параллельной архитектуры, грид-сети, прикладное программное обеспечение конечно-элементного анализа, специфика сборочно-сварочных объектов и технологий.

Abstract. A description of the technological capabilities of the educational grid segment is given in the following areas: creation, management, organization of work, a set of application software, assistance in the design of welded structures.

Keywords: high-performance supercomputer installations of parallel architecture, grid networks, application software for finite element analysis, specifics of assembly and welding facilities and technologies.

Образовательный ГРИД-сегмент на базе персональных суперкомпьютерных конфигураций (далее – образовательный ГРИД-сегмент «ГРИД-СНГ») создан в рамках отдельного задания проекта «Развитие инфраструктуры суперкомпьютерных центров в интересах инновационного развития государств-участников СНГ» Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств-участников СНГ на период до 2020 г. (рис. 1 и 2). Главной целью задания являлось создание образовательного ГРИД-сегмента «ГРИД-СНГ» на базе офисных кластеров, предназначенного для организации в Республике Беларусь процесса обучения студентов, аспирантов и сотрудников высших учебных заведений работе на вычислительной технике с параллельной архитектурой в грид-среде с распределенными суперкомпьютерными ресурсами (рис. 3).



Рис. 1. Обобщенная структура образовательного ГРИД-сегмента «ГРИД-СНГ»

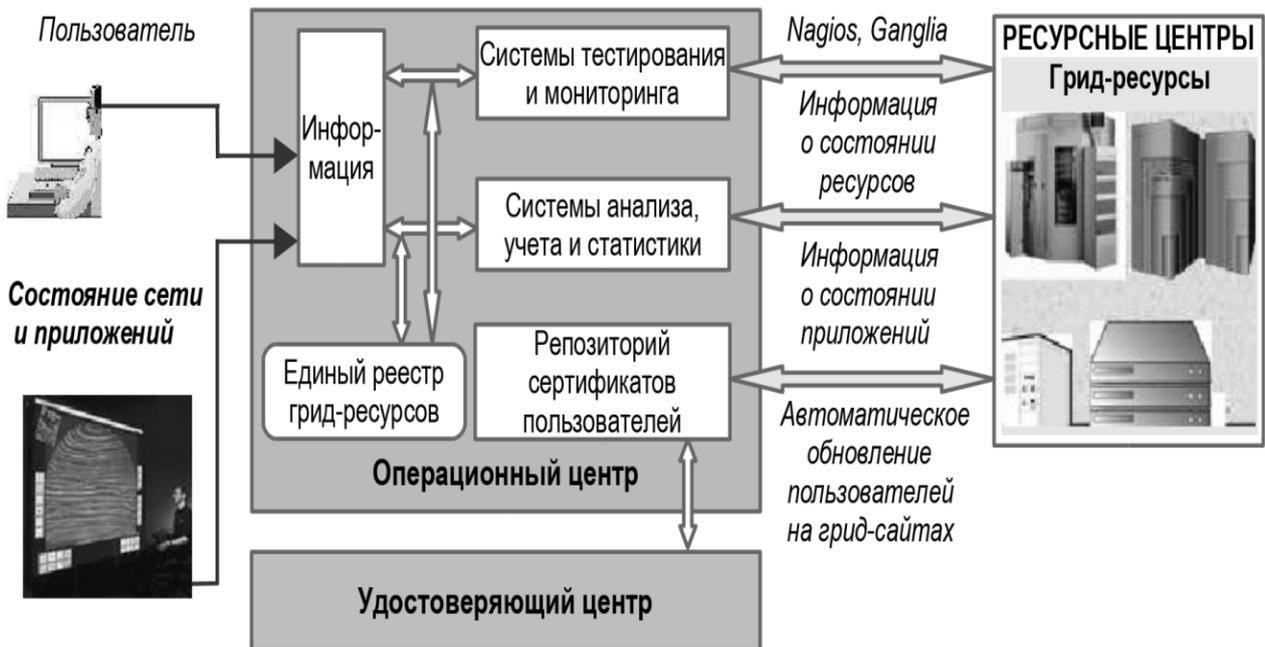


Рис. 2. Укрупненная структура национальной грид-сети



Рис. 3. Структурная схема ресурсного центра ВУЗа

Изготовлены два кластера «СКИФ-ГРИД-СНГ-Офис» и проведены их функциональные испытания [1]. Создан образовательный ГРИД-сегмент «ГРИД-СНГ» и проведены его приемочные испытания [2, 3]. По результатам испытаний откорректированы комплекты конструкторской документации для ОО кластера «СКИФ-ГРИД-СНГ-Офис» и программной документации образовательного ГРИД-сегмента «ГРИД-СНГ». Комплект программной документации образовательного ГРИД-сегмента «ГРИД-СНГ» включает руководство оператора и руководство системного программиста.

Руководство оператора содержит сведения о назначении клиентских приложений, настройках параметров данных приложений и о действиях пользователя при работе с заданиями.

Руководство системного программиста содержит сведения о составе образовательного ГРИД-сегмента «ГРИД-СНГ», составе сервисов грид-сайтов, инструкции по установке и настройке системного ПО на грид-сайтах образовательного ГРИД-сегмента, администрированию и тестированию грид-сайтов. По результатам приемочных испытаний комплекту программной документации образовательного ГРИД-сегмента «ГРИД-СНГ» в установленном порядке присвоена литера «О1».

Распределенная структура ГРИД-сегмента сварочной направленности подчеркивает интегрирующую роль сборочно-сварочного передела в технологической подготовке современных машиностроительных производств и позволяет на практике реализовать принципы конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций Н. О. Окерблома и CALS-технологий [4, 5].

ГРИД-сегмент располагает лицензионным программным обеспечением конечно-элементного анализа (ANSYS-LS-DYNA) в параллельных версиях, а также ПО в свободных кодах (OpenFoam, CodeAster и др.). Открытая архитектура ГРИД-сегмента предоставляет возможности подключения сторонних вычислительных ресурсов из-за пределов РБ, а также гридификации используемых на этих ресурсах программных средств.

Обширные объемы дисковых хранилищ, возможности параллельной работы над совместными проектами структурных подразделений предприятий, кафедр и других организаций Союзного государства, построение детализированных цифровых двойников сварных конструкций, технологий сборки-сварки и средств технологического оснащения в совокупности позволяют создавать конкурентоспособную продукцию сборочно-сварочных производств с меньшими затратами, а также готовить студентов-сварщиков с углубленными знаниями и навыками в области информационно-коммуникационных технологий и суперкомпьютерных вычислений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белорусские суперкомпьютеры семейства СКИФ / Н. Н. Парамонов [и др.]. – Гомель: Вечерний Гомель-Медиа, 2020. – 268 с.
2. Операционный центр национальной грид-сети / О. П. Чиж [и др.] // Суперкомпьютерные системы и их применение. SSA'2010: докл. 3 Междунар. науч. конф., Минск, 25–27 мая 2010 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – С. 89–94.
3. Операционный центр национальной грид-сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pos.grid.basnet.by>. – Дата доступа: 20.09.2022.
4. **Окерблом, Н. О.** Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – Москва; Ленинград: Машиностроение, 1964. – 420 с.
5. **Медведев, С. В.** Конструктивно-технологическое проектирование и моделирование сварных конструкций в распределенных суперкомпьютерных средах / С. В. Медведев // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 24–29.

E-mail: otchij@newman.bas-net.by; nikita.semeniak@newman.bas-net.by; medv@newman.bas-net.by.

УДК 621.791.03

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОЧНЫХ ТАКСИ

Д. В. ШНИП, Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791.03

AUTOMATED QUALITY CONTROL SYSTEMS FOR WELDED JOINTS IN THE PRODUCTION OF DAIRY TAXIS

D. V. SHNIP, G. S. LENEVSKY

Аннотация. Обеспечение продовольственной безопасности Республики Беларусь на современном этапе развития общества является одной из важнейших задач. В настоящий момент сложилась мировая практика производства продуктов питания в животноводстве на молочно-товарных фермах (МТФ), при этом важнейшим процессом для повышения производительности и репродукции дойного стада является выращивание молодняка.

Ключевые слова: молочно-товарные фермы, молодняк, стадо, животноводство, питание, сварка, регистратор.

Abstract. Ensuring food security of the Republic of Belarus at the present stage of society is one of the most important tasks. At the moment, the world practice has developed – the production of food in animal husbandry on dairy farms (MTF) is the cultivation of young animals to replenish the milking herd.

Keywords: dairy, farms, young animals, herd, animal husbandry, nutrition, welding, registrar.

При выращивании телят, особенно в первые несколько месяцев, важнейшим является обеспечение качественного процесса кормления, которое невозможно без использования оборудования высокого качества. Оборудование должно иметь высокие показатели надежности и без отказов и потерь обеспечивать технологические процессы приготовления, доставки к месту кормления и дозированную порционную раздачу жидкой кормовой смеси (ЖКС).

Для обеспечения технологического процесса доставки ЖКС необходимо обеспечить качественное изготовление мобильной автономной транспортной платформы (МАТП) молочного такси. Естественно, что для изготовления мобильной автономной транспортной платформы (МАТП) используется электрическая сварка. При этом для первичного контроля качества сварных соединений профильных труб из нержавеющей стали марки AISI 304 и

профильных труб из стали марки 20 можно успешно применять визуальный контроль. Однако данное решение имеет целый ряд недостатков:

- для выполнения данной операции требуется специалист (инженер, магистр) высокой квалификации;
- большие затраты времени (необходимо выполнять контроль качества более 100 сварных соединений (сварных швов));
- высокая вероятность получения недостоверных результатов;
- постоянные значительные расходы на заработную плату.

Значительно повысить качество, уменьшить время контроля сварных соединений, почти исключить вероятность получения недостоверных результатов, значительно уменьшить постоянные расходы на заработную плату (за счет увеличения в несколько раз производительности труда, т. е. уменьшения времени, необходимого на контроль сварных соединений) позволяет предлагаемая автоматизированная система контроля качества сварных соединений при производстве МАТП молочных такси. Функциональная схема предлагаемой автоматизированной системы контроля качества сварных соединений представлена на рис. 1.

Для практической реализации автоматизированной системы контроля качества сварных соединений при производстве МАТП молочных такси различной емкости приготавливаемых и транспортируемых ЖКС предлагается следующая последовательность технических задач.

1. Разработка и изготовление технологической 3D-оснастки с собственной ЧПУ и системой силовых электроприводов для фиксации и элементов конструкции рамы МАТП, а также позиционирования рамы МАТП для выполнения сварных соединений в плоскостях XY , XZ , YZ .

2. Разработка программного обеспечения (ПО) (эталонной модели сварочных процессов) для рамы МАТП, промышленный компьютер б.

3. Разработка ПО (реальной модели сварочных процессов) (промышленный компьютер б) на базе данных промышленного регистратора сварочных процессов 5 для рамы МАТП.

4. Разработка ПО (промышленный компьютер б) для определения возможных дефектов сварных соединений на основе сравнения технологических характеристик эталонной и реальной моделей сварочных процессов.

5. Разработка ПО для системы ЧПУ сварочного робота 4.

6. Разработка ПО для системы ЧПУ источника сварочного тока 8.

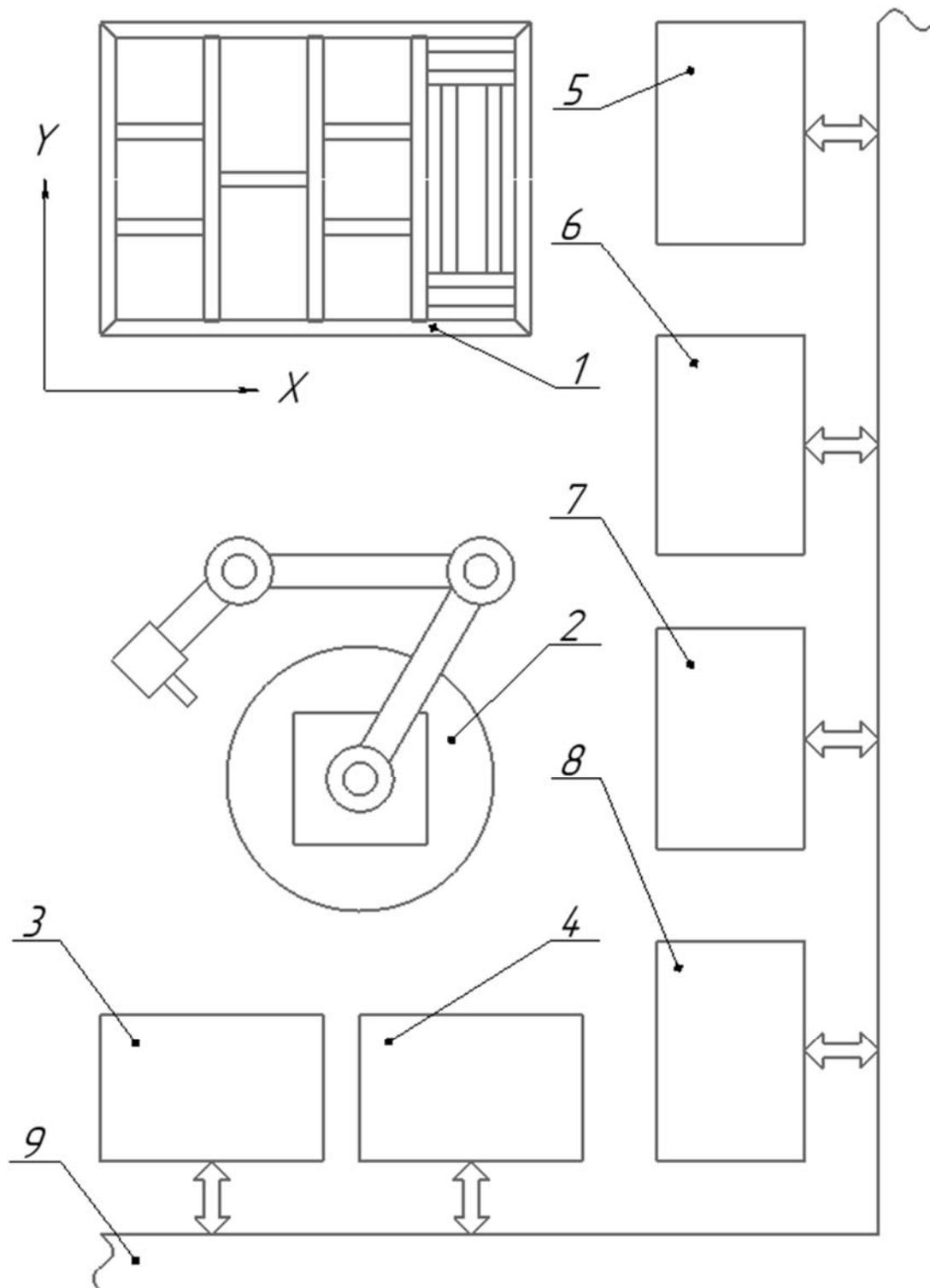


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемой автоматизированной системы контроля качества сварных соединений (АСККСС): 1 – рама МАТП на технологической 3D-оснастке; 2 – манипулятор сварочного робота; 3 – шкаф силовой электроприводов; 4 – система ЧПУ сварочного робота; 5 – промышленный регистратор сварочных процессов; 6 – промышленный компьютер; 7 – устройство печати; 8 – источник сварочного тока; 9 – информационный канал

7. Разработка ПО для задания параметров технологического процесса изготовления рамы МАТП, регистрации и визуализации параметров технологического процесса (сварочных процессов) или разработка либо программирование SCADA-системы.

При реализации данной концепции автоматизированной системы контроля качества сварных соединений возможно и целесообразно использовать следующее оборудование, приборы и программное обеспечение.

Выбор сварочного робота определяется такими базовыми характеристиками, как количество степеней свободы, вид электропривода, эффективная нагрузка, кг, точность повторного позиционирования, мм, диапазон действия, мм, максимальная скорость, мм/с, максимально допустимый крутящий момент, Н · м, стоимость.

При этом необходимо учитывать то, что при общей схожести конструкции рамы МАТП имеют различные размеры, определяемые объемом ЖКС (в литрах), который выбирается из следующего ряда значений: 100, 200, 250, 300, 400 и т. д.

В качестве регистратора сварочных процессов можно использовать промышленные регистраторы сварочных процессов моделей ИРСП11, ПИРС-03, РСР-102Д, РСР301, РП-ПРО.5, РТП-4, Р-3704М, ПИ-44-1, РПМ-416, Р-3704-06, РКДП-1301.

При выборе источников сварочного тока могут использоваться модели сварочных источников питания фирм MEGMEET, GSK, EWM, LORCH, КЕМРРІ, ESAB.

В качестве ПО верхнего уровня применяется SCADA TRACE MODE (Адастра, Москва). Это высокотехнологичная система, объединяющая в едином целом продукты класса SOFTLOGIC-SCADA/HMI-MES, которая используется на кафедре «Электропривод и АПУ» более 10 лет в научных проектах и учебном процессе подготовки инженеров-электриков специальности «Автоматизированные электроприводы».

Концепцию построения автоматизированной системы контроля качества сварных соединений на кафедре «Электропривод и АПУ» успешно развивают для более сложных объектов, таких как, например, детали рам и кузовов, кузова и рамы различных моделей автомобилей, выпускаемых в Республике Беларусь предприятиями автомобильной промышленности МАЗ, БЕЛАЗ и другими, а также таких элементов конструкции молочных такси, как рабочие цилиндры различных объемов.

Следует отметить, что для реализации данных проектов в полном объеме необходимо разработать сварочных роботов принципиально новой конструкции.

УДК 621.791.927

РАЗРАБОТКИ НИУ «МЭИ» В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ С ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

А. В. ЩЕРБАКОВ, Д. А. ГАПОНОВА, А. П. СЛИВА, Р. В. РОДЯКИНА, А. В. ГУДЕНКО, А. Л. ГОНЧАРОВ, В. К. ДРАГУНОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 621.791.927

DEVELOPMENTS OF NRU «MPEI» IN THE FIELD OF WIRE-BASED ELECTRON BEAM WELDING DEPOSITION CONTROL

A. V. SHCHERBAKOV, D. A. GAPONOVA, A. P. SLIVA, R. V. RODYAKINA, A. V. GUDENKO, A. L. GONCHAROV, V. K. DRAGUNOV

Аннотация. Показаны основные проблемы управления процессом электронно-лучевой наплавки с подачей присадочной проволоки при аддитивном формообразовании металлических изделий. Раскрыты технические решения, реализованные в НИУ «МЭИ» для автоматизации процесса аддитивного формообразования. Приведены особенности применения осцилляции электронного пучка для управления пятном нагрева и направленным переносом металла. Проведен анализ методов измерения расстояния «формируемый слой – электронная пушка» и поперечного профиля слоя. Описан прототип системы стабилизации температуры формируемого слоя.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, аддитивное формообразование, система управления, осцилляция электронного луча, датчики расстояния, датчики температуры, замкнутая система управления.

Abstract. The main problems of wire-based electron-beam deposition process control for additive manufacturing of metal products are shown. The technical solutions implemented in NRU «MPEI» for automating the process of additive shaping are disclosed. The features of the application of electron beam oscillations to control the heating spot and directed metal transfer are presented. The analysis of methods for measuring the distance «formed layer – electron gun» and the transverse profile of the layer is carried out. A prototype of the system for stabilizing the temperature of the formed layer is described.

Keywords: electron beam deposition, additive manufacturing, control system, electron beam oscillation, distance sensors, temperature sensors, closed loop control system.

Процесс электронно-лучевой наплавки с подачей присадочной проволоки подразумевает формирование изделий путем многослойной наплавки единичных металлических слоев по траекториям, задаваемым системой числового программного управления. На рис. 1 показана структура системы управления данным процессом, разработанной в НИУ «МЭИ».

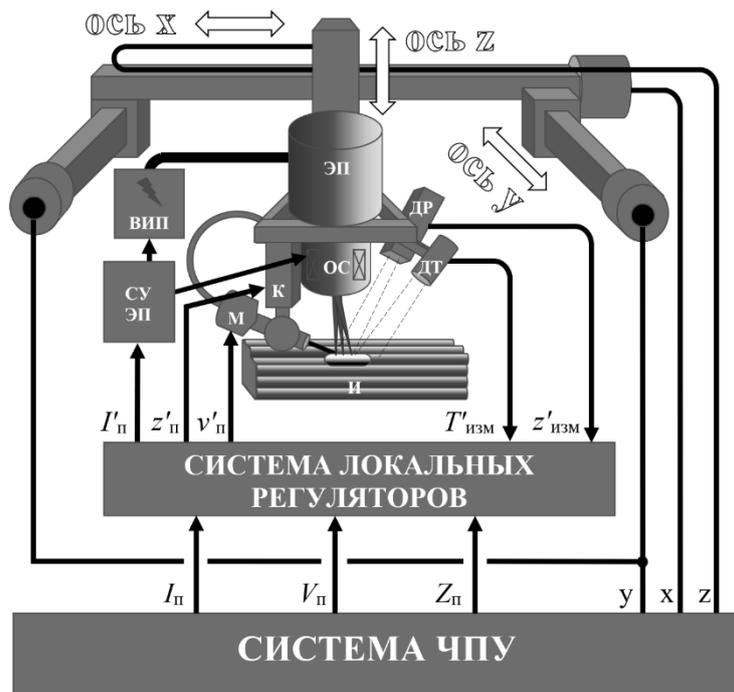


Рис. 1. Структура системы управления процессом электронно-лучевой наплавки, разработанной в НИУ «МЭИ» для реализации процесса аддитивного формообразования

Система числового программного управления (ЧПУ) установки управляет перемещением электронной пушки (ЭП) по трем ортогональным осям – x , y и z . Для работы ЭП необходимы высоковольтный источник питания ВИП и система управления СУ ЭП, обеспечивающая внешнее управление током электронного пучка $I_{п}$ отклоняющими системами ОС и работу других каналов управления электронной пушки (накал катода, фокусировка и т. д.). Для интеграции канала управления током электронного пучка в систему ЧПУ используется система локальных регуляторов, реализованная на микроконтроллере. Эта система формирует сигнал управления током $I'_{п}$ с характеристиками, регламентированными СУ ЭП (выходной сигнал ЧПУ $I_{п}$ является частотным, а входной сигнал СУ ЭП $I_{п}$ инкрементным). ЧПУ задает скорость подачи проволоки $V_{п}$ и координату положения мундштука подачи $Z_{п}$. Скорость подачи регулируется роликовым механизмом М, а положение мундштука – корректирующим механизмом К. Сигналы управления этими механизмами на рис. 1 показаны как $v'_{п}$ и $z'_{п}$. Система оснащена датчиком температуры ДТ и датчиком расстояния ДР, обеспечивающими измерение температуры формируемого слоя и расстояния «электронная пушка – слой» соответственно. Сигналы этих датчиков $T'_{изм}$ и $z'_{изм}$ поступают в систему локальных регуляторов и обрабатываются программой микроконтроллера.

Для пояснения особенностей разработанных элементов системы управления процессом следует проанализировать основные особенности процесса многослойной наплавки в вакууме, проиллюстрированные рис. 2.

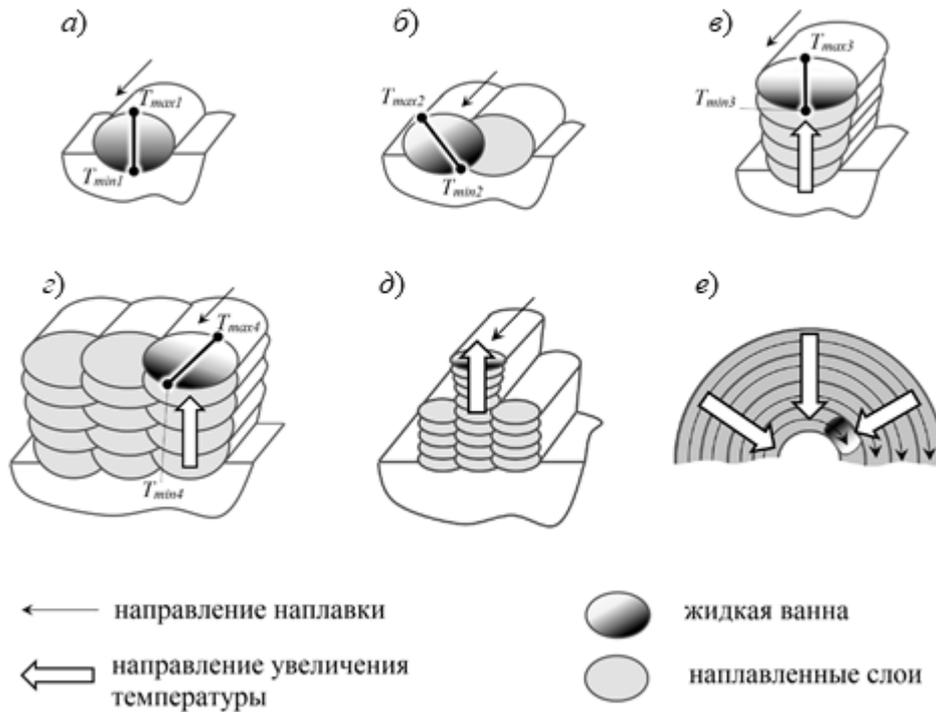


Рис. 2. Особенности формирования многослойных изделий электронно-лучевой наплавкой с подачей присадочной проволоки

При наплавке одиночного слоя (см. рис. 2, а) слой (валик) формируется с отношением высоты к ширине $0,2...1,5$. Температурное поле ванны в поперечном сечении будет практически симметричным относительно средней линии валика (максимальная и минимальная температуры в сечении ванны T_{max1} и T_{min1} показаны условно).

Если требуется наплавка нескольких параллельных валиков подряд (см. рис. 2, б), необходимо корректно выбрать расстояние между слоями. Методика выбора межцентрового расстояния описана во многих работах [1–4]. Отвод тепла от формируемого слоя справа и слева будет неодинаковым: из-за того, что тепло отводится к ранее наплавленному слою за счет теплопроводности, а со стороны, обращенной к вакууму, – за счет излучения, распределение температуры в жидкой ванне будет несимметричным (T_{max2} и T_{min2} на рис 2, б), что будет влиять на форму валика процессы кристаллизации.

При наплавке многослойной стенки толщиной в один валик возникает эффект влияния зон повторного нагрева (см. рис. 2, в), связанный с тем, что первый слой наплавляется на «холодную» подложку, а последующие слои – на подслои, имеющие более высокую температуру. В результате отношение высоты слоя к ширине изменяется: слои становятся все шире и все ниже, и скорость «выращивания» стенки будет снижаться, поэтому часто происходит отрыв проволоки от слоя, а температура ванны будет увеличиваться ($T_{max3} > T_{max1}$).

Аналогичные явления наблюдаются при наплавке массивных многослойных блоков (см. рис. 2, *з*). В этом случае на процесс будут влиять как зоны повторного нагрева, так и несимметрия температурного поля ванны, возникающая из-за различных механизмов отвода тепла. Это будет приводить к постепенному увеличению температуры от слоя к слою, увеличению объема ванны и отклонению ее формы от первоначальной.

Отклонения геометрических размеров слоя и температуры ванны также будут наблюдаться при изменении теплотехнической массивности примыкающих к ванне слоев (см. рис. 2, *д*) и изменении отношений размеров теплоотводящих поверхностей при изменении радиусов поворота траектории наплавки или их длины (см. рис. 2, *е*).

Описанные примеры показывают актуальность непрерывного контроля геометрических размеров наплавляемых валиков и их температуры, а также создания автоматических систем стабилизации соответствующих параметров процесса. Для контроля расстояния «электронная пушка – формируемый слой» можно использовать различные бесконтактные типы датчиков: оптические (времяпролетного типа [5], лазерные триангуляционные [6]), индукционные, радарные (радиочастотные [7]), а также детекторы рентгеновского излучения [8] и обратнорассеянных электронов [9].

Поскольку высота формируемого слоя обычно составляет единицы миллиметров, то дискретность измерения применяемого датчика расстояния должна быть как минимум на порядок меньше. Этим критериям отвечают лазерные измерители расстояния и 2D-сканеры триангуляционного типа. На рис. 3, *а* показана такая система, а в качестве примера использования системы на рис. 3, *б, в* приведены фотография наплавленных стенок и полученная геометрическая модель. На сканере 1 установлена система защиты от воздействия паров металла.

На рис. 3, *г, д* показаны фотографии системы с установленным пирометром 3 для измерения температуры подслоя. Температура измерялась на некотором расстоянии от точки действия луча – от 25 до 50 мм в области «позади» фронта кристаллизации ванны. Для защиты пирометра от воздействия паров металла была установлена трубчатая насадка 4. Для стабилизации температуры слоя были разработаны различные типы программных регуляторов: двухпозиционный, инкрементный, ПИ и ПИД. Было установлено, что приемлемое качество переходных процессов обеспечивается при использовании инкрементного способа управления и дискретного ПИ-регулятора. На рис. 3, *е* приведена осциллограмма, иллюстрирующая работу системы при инкрементном способе управления током электронного пучка.

Задание минимального значения необходимо для предотвращения режима, при котором погонная энергия недостаточна для полного расплавления проволоки, а максимального – для исключения перерегулирования при настройке коэффициентов передачи регулятора.

На рис. 3, *ж* приведен макрошлиф цилиндрического изделия из стали 316L, полученного при наплавке 54 слоев с применением системы стабилизации температуры.

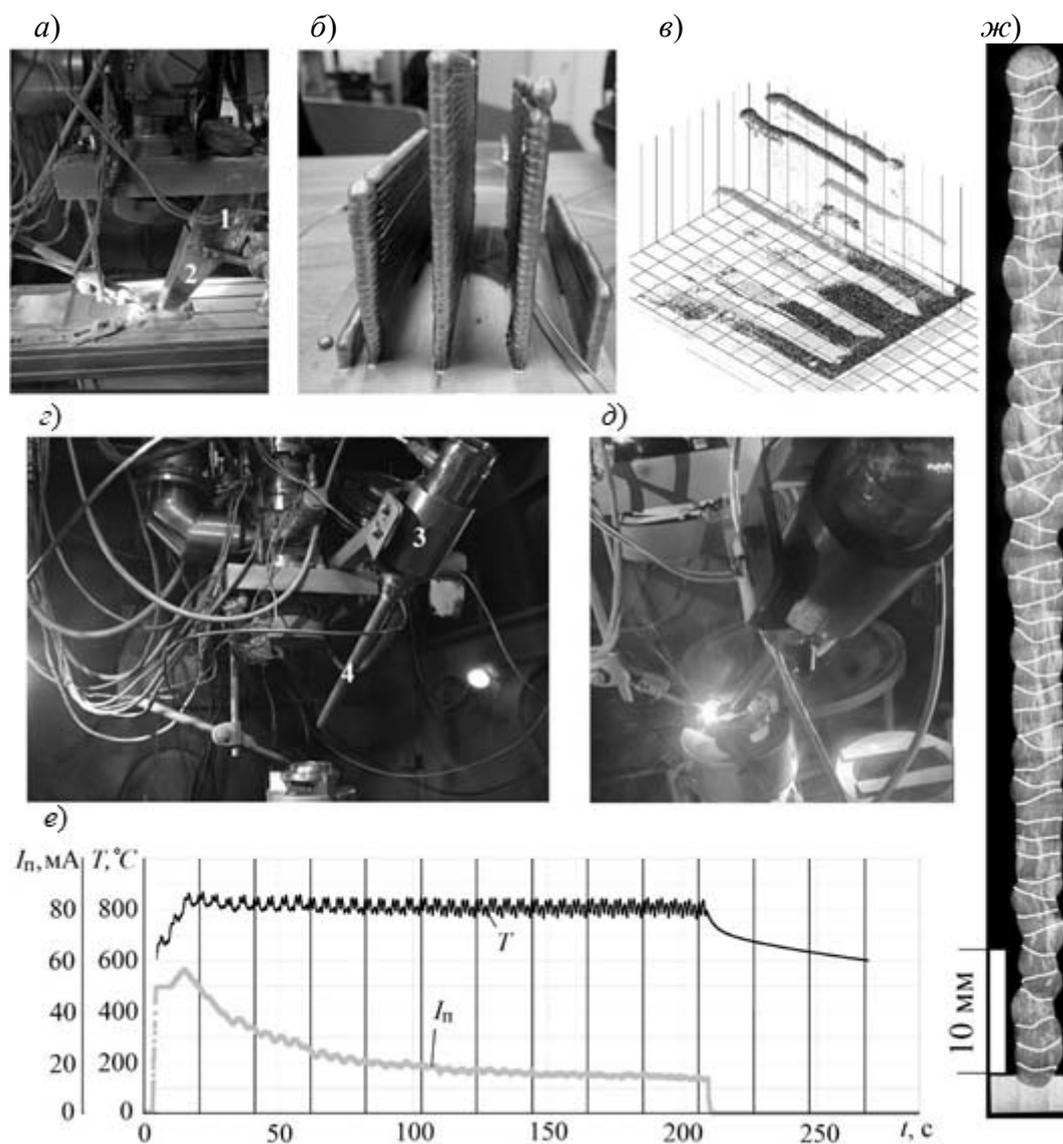


Рис. 3. Элементы системы управления процессом многослойной электронно-лучевой наплавки, разработанные в НИУ «МЭИ»: *а* – стенд с триангуляционным лазерным сканером; *б* – сканируемые изделия (наплавленные стенки); *в* – результат сканирования; *г* – стенд с пирометром для измерения температуры слоя; *д* – процесс наплавки с измерением температуры; *е* – типичные осциллограммы тока пучка I_n и температуры T ; *ж* – поперечный макрошлиф цилиндрической стенки из стали 316L, наплавленной со стабилизацией температуры слоя (линиями показаны границы слоев)

Заключение.

1. Проведен анализ факторов, приводящих к отклонению геометрических параметров формируемых слоев, а также структуры и свойств материала в процессе наплавки многослойных изделий. Показана необходимость корректировки положения точки ввода материала (присадочной проволоки) и стабилизации температуры формируемого слоя.

2. Описана структура многоконтурной системы управления процессом электронно-лучевой наплавки многослойных изделий, обеспечивающей непрерывный контроль параметров наплавки – расстояния между наплавляемым слоем и электронной пушкой и температуры слоя, а также их стабилизацию с помощью локальных программных регуляторов за счет изменения тока луча и корректировки положения мундштука подачи проволоки.

3. Показана принципиальная возможность стабилизации температуры наплавляемого слоя за счет изменения тока электронного пучка в процессе наплавки при использовании инкрементного или ПИ-регулирования.

Работы по разработке и наладке программного обеспечения системы управления выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Стипендии Президента Российской Федерации СП-2918.2021.1.

Работы по созданию аппаратной части системы управления процессом наплавки, технологические работы и контроль экспериментальных образцов выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF – 2020-0023).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 81 (1–4). – P. 465–481.

2. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing / J. Xiong [et al.] // Robot Comput Integr Manuf. – 2013. – Vol. 29. – P. 417–423.

3. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping / W. Aiyiti [et al.] // Rapid Prototyp J. – 2006. – Vol. 12. – P. 165–172.

4. Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique / F. Pixner [et al.] // Materials. – 2020. – Vol.13. – P. 3310.

5. **Hossein, Taheri.** Nondestructive evaluation and in-situ monitoring for metal additive manufacturing: Ph. D. dissertation / Taheri Hossein. – Iowa State University, 2018.

6. Режим доступа: <http://prizmasensors.ru/ls2d-triangulyacionnyj-lazernyj-2d-datchik/>.

7. Micrometer Sensing With Microwaves: Precise Radar Systems for Innovative Measurement Applications / F. Michler [et al.] // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Vol. 1, № 1. – P. 202–217.

8. Wire Position Sensor for Controlling the Process of Electron Beam Layer-by-Layer Deposition: Modeling and Verification / D. N. Trushnikov [et al.] // IEEE Sensors Journal. – Vol. 21, № 3. – P. 3134–3142.

9. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 969, 012105 / A. V. Shcherbakov [et al.]. – 2020.

E-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru.

УДК 621.791.763.2

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ Т-ОБРАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ

Д. Н. ЮМАНОВ, С. М. ФУРМАНОВ, С. Ф. МЕЛЬНИКОВ

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.791.763.2

FEATURES OF RESISTANCE PROJECTION WELDING OF T-SHAPED JOINTS WITH THE APPLYING OF HEAT INPUT PROGRAMMED CONTROL SYSTEM

D. N. YUMANOV, S. M. FURMANOV, S. F. MELNIKOV

Аннотация. В статье приведены результаты исследования процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений с применением системы программного управления мощностью тепловложения. Обеспечение стабильного качества Т-образных соединений при контактной рельефной сварке является актуальной задачей в связи с трудностями, возникающими в производственном секторе, связанными с определением и корректировкой параметров режима сварки. В работе приводится анализ причин возникновения дефектов при контактной рельефной сварке Т-образных соединений. Авторами работы предлагаются пути совершенствования технологии контактной рельефной сварки Т-образных соединений на основе проведенных экспериментальных исследований и разработанной системы управления процессом сварки.

Ключевые слова: контактная рельефная сварка, способы сварки давлением, Т-образные соединения, оборудование для управления процессом рельефной сварки, качество соединений при контактной сварке.

Abstract. The paper presents the results of a study of the process of resistance relief projection welding of T-shaped joints using a heat input program control system. Ensuring the stable quality of T-shaped joints in resistance projection welding is an urgent task, due to the difficulties that arise in the manufacturing sector, which are associated with the determination and adjustment of welding mode parameters. The paper provides an analysis of the causes of defects in the resistance projection welding of T-shaped joints. The authors of the work propose ways to improve the technology of resistance projection welding of T-shaped joints, based on the experimental studies and the developed welding process control system.

Keywords: resistance projection welding, pressure welding methods, T-joints, control equipment for resistance projection welding process, quality of joints of projection welding.

На предприятиях машиностроительного комплекса контактная рельефная сварка находит широкое применение при производстве узлов из различных конструкционных материалов в области автомобилестроения, авиастроения, техники для сельскохозяйственных нужд. В настоящее время известно большое количество разнообразных геометрических форм рельефных изделий, получаемых контактной рельефной сваркой Т-образных соединений. Однако

разработка технологических процессов контактной рельефной сварки Т-образных соединений нередко вызывает ряд трудностей, связанных с тем, что в нормативно-технической документации отсутствуют конкретные рекомендации к выбору параметров режима с учетом геометрических особенностей соединения. Требования качества Т-образных сварных соединений неизбежно приводят к необходимости поиска новых методов совершенствования технологии сварки с целью обеспечения необходимого уровня.

Перспективными направлениями повышения качества Т-образных соединений на сегодняшний день являются: использование методов математического моделирования процесса сварки; разработка более совершенного оборудования для управления процессом сварки; разработка программного обеспечения, которое позволяет с достаточной точностью и быстродействием обеспечить корректировку параметров режима сварки на разных этапах без прерывания процесса.

Специфика образования Т-образного соединения с типом рельефа «острой гранью» обладает отличительной особенностью, которая включает в себя несколько этапов (рис. 1).

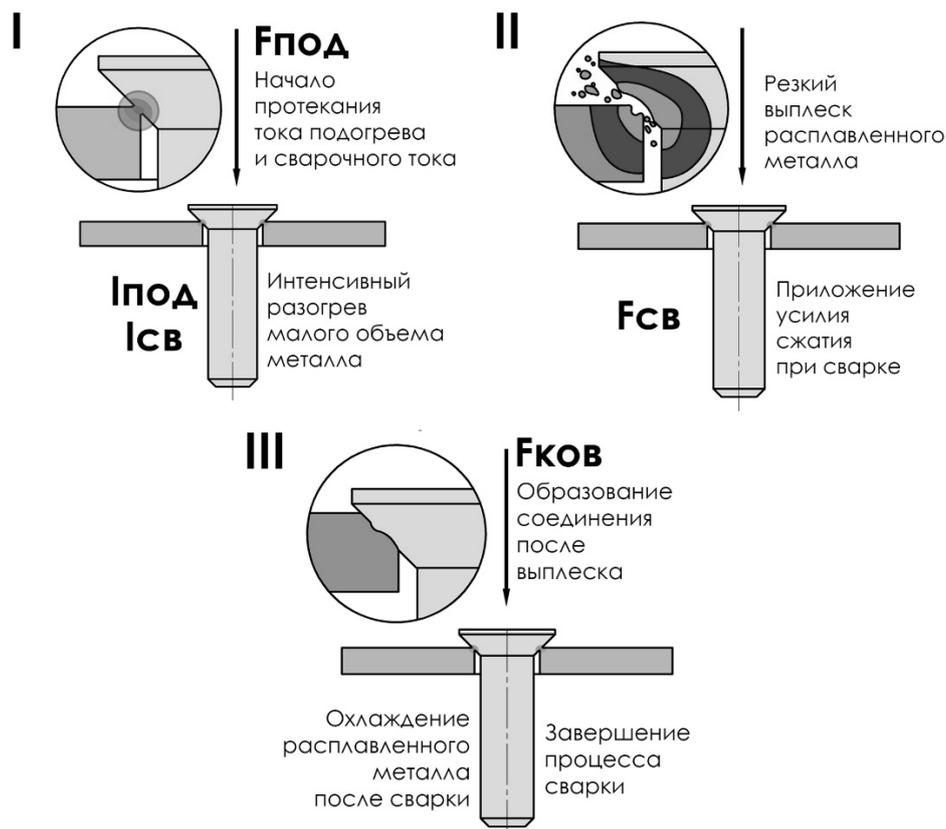


Рис. 1. Специфика образования Т-образного соединения при контактной рельефной сварке на разных этапах процесса

На начальном этапе образования сварного соединения I при приложении тока подогрева $I_{\text{под}}$ и усилия сжатия электродов $F_{\text{под}}$ происходит интенсивный разогрев металла, при котором плотность тока достигает значения $j = 550 \text{ А/мм}^2$

(см. рис. 1, I). На этапе II при приложении сварочного усилия $F_{СВ}$ происходит осадка расплавленного металла, что приводит к появлению в нем внутреннего давления и резкому выплеску металла из зоны сварного соединения (см. рис. 1, II). Выплеск металла происходит еще и потому, что геометрические особенности Т-образного соединения обладают открытыми участками. На завершающем этапе III происходит охлаждение расплавленного металла под действием ковочного усилия $F_{КОВ}$ (см. рис. 1, III). Наличие выплеска при сварке приводит к значительному увеличению площади контакта свариваемых деталей и снижению плотности тока, что существенно снижает механические свойства сварных соединений.

Экспериментальные исследования процесса контактной рельефной сварки Т-образных соединений показали, что при применении серийного оборудования для управления контактной машиной на начальных этапах образования сварного соединения (I, II) присутствует динамический бросок мощности, который сопровождается резким повышением сварочного тока и, соответственно, температуры, что, в свою очередь, приводит к выплеску. Необходимые механические свойства соединений при этом достигаются в 40 %...60 % соединений.

Появление динамического броска мощности при сварке предлагается устранять путем применения циклограммы процесса контактной рельефной сварки с плавным нарастанием мощности от подогрева к сварке (рис. 2).

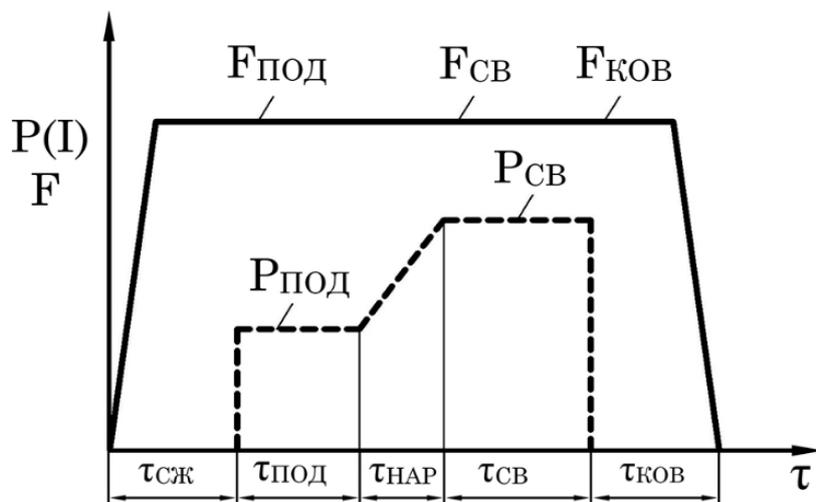


Рис. 2. Циклограмма процесса контактной рельефной сварки с плавным нарастанием мощности

Плавное нарастание мощности между импульсами действия тока задать при помощи серийной аппаратуры для управления процессом сварки не представляется возможным, поэтому были проведены исследования с помощью разработанной системы программного управления процессом контактной рельефной сварки.

Система программного управления представляет собой объединенные блоки и электрические компоненты, которые интегрированы в узлы контактной

Образцы Т-образных сварных соединений, полученных при помощи системы программного управления процессом контактной рельефной сварки, испытывались разрушающими методами контроля.

По результатам проведенных механических испытаний сварных соединений, полученных с системой программного управления, удалось стабилизировать прочностные характеристики. Определено, что количество сварных соединений, обеспечивающих требуемую минимальную разрушающую нагрузку, достигает 97 %...100 % (рис. 4).

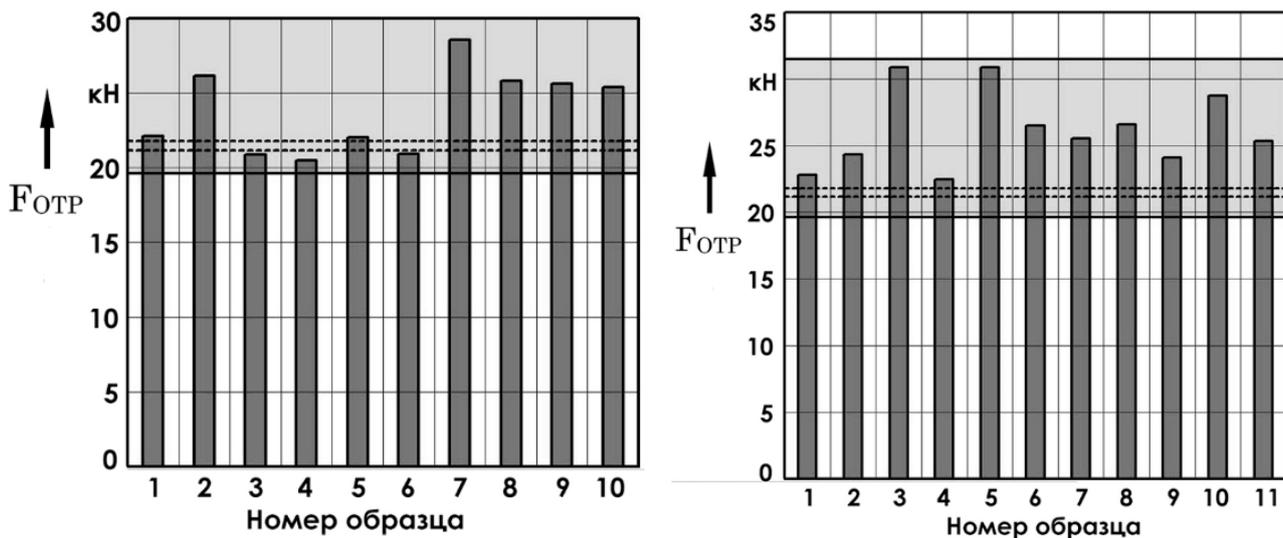


Рис. 4. Результаты механических испытаний Т-образных сварных соединений с применением системы программного управления

При этом диапазон значений усилия на отрыв составляет 20...31 кН, что значительно превосходит диапазон усилий при испытании сварных соединений с применением серийного оборудования управления контактной сварочной машиной.

С целью определения дефектности Т-образных сварных соединений были проведены металлографические исследования. Применение системы программного управления и циклограммы процесса с плавным нарастанием тока благоприятно сказалось на структуре сварных соединений, т. к. при сварке не наблюдаются выплески. По сечению сварного соединения наблюдается равномерная ферритоперлитная структура. Изучение макроструктуры образцов сварных соединений показало отсутствие дефектов (рис. 5).

При изучении микроструктуры образцов Т-образных сварных соединений при сварке на серийном оборудовании управления процессом определено, что в сварном соединении не наблюдается общей литой зоны. Это связано с тем, что основной объем расплавленного металла удаляется вместе с выплеском (см. рис. 5). На образцах сварных соединений, полученных с использованием системы программного управления, наблюдается литая структура в виде образовавшихся зерен металла свариваемых деталей (см. рис. 5) [2].

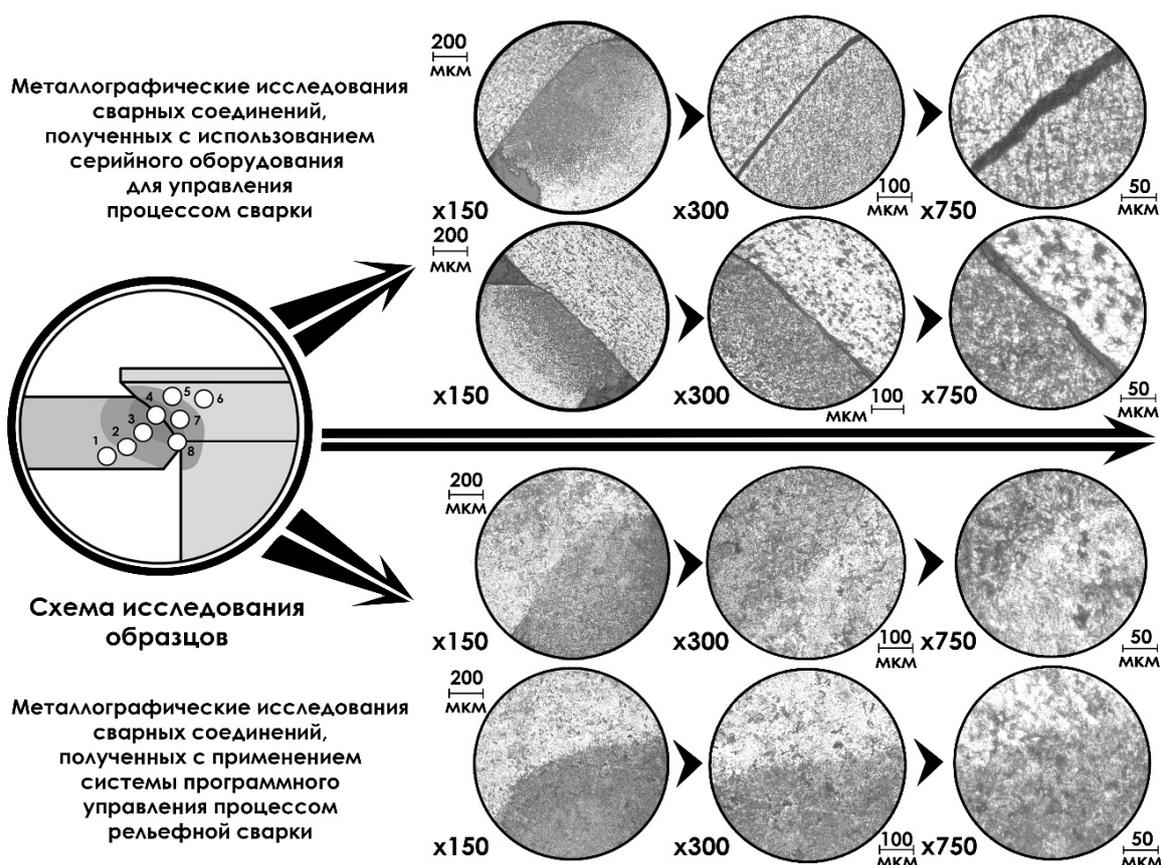


Рис. 5. Сравнительные результаты металлографических исследований Т-образных соединений, полученных контактной рельефной сваркой

Таким образом, по результатам проведенных исследований технологии контактной рельефной сварки Т-образных соединений с программным управлением мощностью тепловложения определены пути обеспечения качества сварных соединений. На основании проведенных экспериментальных исследований и разработанной системы программного управления предложен способ обеспечения стабильности механических свойств Т-образных сварных соединений, получаемых контактной рельефной сваркой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерное управление процессом контактной рельефной сварки с помощью среды графического программирования LabVIEW / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2. – С. 54–62.

2. О влиянии энергии тепловложения на ширину линии сплавления Т-образных соединений при рельефной сварке с программным управлением / С. М. Фурманов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 4. – С. 88–95.

E-mail: oitsp.dmitriy.y@gmail.com; pochta_furm@mail.ru.

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДА В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Д. И. ЯКУБОВИЧ, А. В. ШАБЛОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

UDC 621.791

INVESTIGATION OF METALLURGICAL PROCESSES OF DISSOLUTION OF SILICON AND CARBON IN A WELDING BATH DURING ARC WELDING

D. I. YAKUBOVICH, A. V. SHABLOVSKY

Аннотация. Представлены результаты исследований по растворению кремния и углерода в металле сварочной ванны при дуговой сварке и наплавке. Показано, что при увеличении времени существования жидкой фазы увеличивается и количество растворенных элементов. Показана возможность применения мелкодисперсных порошковых материалов на основе SiC в качестве добавок в шихту покрытия электродов.

Ключевые слова: ручная дуговая сварка покрытыми электродами, аргонодуговая наплавка неплавящимся электродом, твердость, карбид кремния.

Abstract. The results of studies on the dissolution of silicon and carbon in the metal of the welding bath during arc welding and surfacing are presented. It is shown that with an increase in the lifetime of the liquid phase, the number of dissolved elements also increases. The possibility of using fine powder materials based on SiC as additives to the electrode coating charge is shown.

Keywords: manual arc welding with coated electrodes, argon arc surfacing with a non-melting electrode, hardness, silicon carbide.

Введение. Компоненты, входящие в покрытие электродов для ручной дуговой сварки, оказывают существенное влияние на металлургические процессы в сварочной ванне. В сталях, кроме углерода, одним из основных легирующих компонентов, добавляемых в шихту для изготовления электродов, является кремний, который оказывает влияние на окислительный потенциал и повышение прочностных характеристик сварного шва.

Содержание кремния в стали должно находиться в пределах 0,3 %...0,6 % [1, 2]. При увеличении содержания свыше 1 % происходит резкое снижение прочности и ударной вязкости [3, 4].

Увеличение содержания углерода в наплавленном металле осуществляют в основном для повышения твердости. При кристаллизации и последующего охлаждения в металле образуются фазы, имеющие высокую твердость, а в сочетании с пластичной матрицей они обеспечивают высокую износостойкость [5, 6]. Содержание углерода в сварных швах из низкоуглеродистых сталей не должно превышать 0,25 %.

При производстве покрытия электродов для ручной дуговой сварки легирующие частицы используются с максимальным значением размеров в

несколько десятых миллиметра. Применение компонентов шихты, имеющих размеры в несколько десятков микрометра, на практике редко реализуемый процесс. Использование такого мелкодисперсного порошка приведет к изменению металлургических процессов в кристаллизуемом металле. Влияние мелкодисперсных частиц порошка на свойства сварного шва – малоизученный процесс, а следовательно, заслуживает научного исследования.

Совместное применение кремния и углерода возможно при использовании карбида кремния, который в настоящее время образуется в больших количествах после переработки отходов от изготовления полупроводниковых приборов, радиодеталей и солнечных батарей. Получаемый порошок относится к мелкодисперсным с размерами до 15 мкм.

Работа посвящена изучению металлургических процессов и изменения механических свойств от содержания углерода и кремния в металле шва, а также возможностей их использования в составе покрытия электродов для ручной дуговой сварки и наплавки.

Результаты исследований и их обсуждение. При прямом плавлении SiC электрической дугой установлено, что порошок активно выгорает с образованием крайне малых объемов жидкой фазы. Поэтому на первом этапе исследований для выявления эффективности насыщения C и Si расплавленного металла было предложено растворять данные элементы в объеме металла до 2...3 см³. Для этого расплавление SiC проводили вместе с металлической стружкой из стали 10 в медной изложнице. Из-за своей высокой теплопроводности и теплоотдачи в окружающую среду медь не расплавлялась и не оказывала влияния на химический состав получаемых образцов. Для каждой плавки использовали 0,5 см³ порошка и 15 г стружки. Расплавление осуществляли электрической дугой, горячей в среде аргона при использовании неплавящегося электрода. Металл полностью расплавлялся в течение 40 с. Химический состав металла представлен в табл.1.

Табл. 1. Химический состав расплавленного металла в изложнице и твердость с добавлением SiC

Время плавления, с	C	Si	Твердость, HRC
40	1,01...1,05	3,36...3,51	29...38

Установлено, что углерод и кремний не выгорают, а активно растворяются в жидком металле в объемах, существенно превышающих их процентное содержание в низкоуглеродистых сталях.

На втором этапе исследований проверялась возможность насыщения кремнием и углеродом наплавленного шва. Для ввода порошка в жидкую сварочную ванну был выбран способ аргонодуговой наплавки неплавящимся электродом в среде аргона по наплавочной пасте, которую изготавливали путем перемешивания порошка SiC с силикатным клеем. Пасту наносили толщиной 2 мм и шириной 5 мм на пластины из стали 10.

Выбор пасты обусловлен надежным удержанием порошка на наплавляемой поверхности, а также перемешиванием порошка с металлом жидкой сварочной ванны, минуя столб электрической дуги, непосредственно в катодной области. Для удаления влаги подготовленные образцы подвергали естественной сушке в течение 24 ч с последующей прокалкой при 150 °С в течение 2 ч непосредственно перед наплавкой.

Для установления влияния режимов наплавки на химический состав наплавленного шва применялись три варианта силы сварочного тока: 105, 140, 190 А. В качестве источника питания сварочной дуги использовался MasterTig MLS3000.

Химический состав поверхности наплавленных швов представлен в табл. 2.

Табл. 2. Химический состав поверхности наплавленных швов и твердость с добавлением SiC

Сила сварочного тока, А	С	Si	Твердость, HRC
105	0,35...0,39	3,63...3,82	27...38
140	0,26...0,28	2,32...2,53	29...35
190	0,25...0,27	2,13...2,29	35...45

Установлено снижение содержания С и Si при увеличении силы сварочного тока. Такое изменение связано с увеличением глубины проплавления и увеличением объема жидкой сварочной ванны, в котором растворяются легирующие элементы.

Увеличение твердости на образцах с большей силой тока вызвано увеличением тепловложения в образцы, времени существования жидкой фазы и времени протекания фазовых превращений в твердом металле, что приводит к увеличению количества химических соединений, повышающих твердость.

На третьем этапе исследований определялось влияние SiC на твердость сварного шва и прочность сварного соединения.

Для проведения исследований изготавливались электроды на основе стандартного покрытия электродов марки МР-3, куда дополнительно вводился порошок карбида кремния. Изготовили три партии электродов. Сухую шихту смешивали с мелкодисперсным порошком в процентном отношении 2 %, 5% и 7 % от массы шихты.

Электроды изготавливали методом прессования с использованием специально разработанной оснастки, которая обеспечивала закрепление и центровку металлического стержня, а также равномерное распределение требуемого объема покрытия по длине электрода.

Полученные электроды подвергали естественной сушке при 18 °С...25 °С в течение 24 ч и последующей прокалке при 150 °С в течение 1,5 ч.

Сварку выполняли на пластинах толщиной 10 мм из стали 10 при силе сварочного тока 100...110 А. В качестве источника питания для сварки использовали сварочный аппарат ESAB ET 300iP. Угол разделки кромок и зазор между свариваемыми пластинами соответствовал соединению С17. Размеры полученных сварных швов соответствовали требованиям ГОСТ 5264–80.

Из сваренных пластин вырезали образцы для испытания на прочность. Установлено, что предел прочности всех образцов составлял 460...500 МПа. Данные значения находятся выше стандартного диапазона. Все образцы разрывались по основному металлу. Из изложенного можно сделать вывод, что добавление SiC до 7 % в шихту покрытия электродов оказывает положительное влияние на свойства сварного шва.

Для установления значений содержания углерода и кремния, соответствующих низкоуглеродистым сталям, проводился химический анализ выполненных сварных швов. Полученные значения представлены в табл. 3.

Табл. 3. Химический состав поверхности сварных швов и твердость с добавлением SiC

Количество добавленного SiC, %	C	Si	Твердость, НВ
2	0,11...0,12	0,46...0,60	240...260
5	0,15...0,17	0,84...0,86	255...270
7	0,16...0,20	0,91...1,09	280...295

Анализ химического состава показывает закономерный результат [6–8] увеличения содержания углерода и кремния при увеличении их содержания в покрытии электрода, а также свидетельствует об эффективном переходе данных элементов в жидкий металл сварочной ванны. Дальнейшее увеличение содержания углерода приведет к переходу металла сварного шва в диапазон среднеуглеродистых сталей, что является нецелесообразным с точки зрения технологических особенностей сварки. Увеличение содержания кремния более 1 % также нецелесообразно в связи со значительным падением пластических свойств металла шва.

Увеличение твердости происходит по тем же причинам, что и на первых двух этапах исследований.

Выводы.

1. Установлено, что SiC, получаемый после переработки отходов от изготовления радиодеталей и солнечных батарей, целесообразно использовать в качестве добавок в шихту покрытых электродов для ручной дуговой сварки.

2. При плавлении SiC происходит эффективное насыщение углеродом и кремнием наплавленного металла. Количество добавляемого порошка в шихту покрытия электрода не должно превышать 7 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рябцев, А. И.** Теория и практика наплавочных работ / А. И. Рябцев, И. К. Сенченков. – Киев: Екотехнология, 2013. – 400 с.
2. Микрореагированная сталь для железнодорожных колес / С. Я. Шипицин [и др.] // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 76–79.
3. **Костин, В. А.** Влияние термического цикла сварки на микроструктуру и свойства новых конструкционных сталей с карбидным и карбонитридным упрочнением / В. А. Костин, Г. М. Григоренко // Сварочное производство. – № 2. – С. 3–9.
4. Исследования межфазного взаимодействия ферротипа с карбидом кремния в порошковых смесях, используемых для газотермического нанесения покрытий / Г. М. Григоренко [и др.] // Проблемы современной электрометаллургии. – 2002. – № 4. – С. 37–41.
5. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла, упрочненного карбидами различных типов / И. А. Рябцев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5–6. – С. 84–88.
6. **Якубович, Д. И.** Влияние карбида кремния на технологические свойства покрытия электродов и твердость наплавленного металла при дуговой наплавке / Д. И. Якубович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 157–158.
7. **Якубович, Д. И.** Увеличение твердости наплавленного металла при использовании карбидов в покрытии электродов / Д. И. Якубович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 176.
8. **Якубович, Д. И.** Применение мелкодисперсных порошковых материалов при изготовлении покрытых электродов для ручной дуговой сварки / Д. И. Якубович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 179.

E-mail: D.I.Yakubovich@mail.ru; region-av@mail.ru.

Научное издание

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ В НАУКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Сборник статей I Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 24–25 ноября 2022 года)

**Авторы несут персональную ответственность
за содержание публикуемых материалов**

Корректоры *И. В. Голубцова, А. А. Подошевка,
Т. А. Рыжикова*

Компьютерный дизайн *М. М. Дударева, Е. В. Ковалевская,
Н. П. Полевничая*

Подписано в печать 15.11.2022. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 25 экз. Заказ № 1045.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.