



**Тезисы докладов
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«Сварка в России 2019: Современное
состояние и перспективы».**

3-7 сентября 2019 года, г. Томск, Россия

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук**

**СВАРКА В РОССИИ – 2019:
«СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ»
ПОСВЯЩАЕТСЯ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б.Е. ПАТОНА**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
Международной конференции
<http://www.wr2019.ispms.ru>**

3 -7 сентября 2019 года

г. Томск – 2019

Тезисы докладов Международной конференции «СВАРКА В РОССИИ – 2019: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ». ПОСВЯЩАЕТСЯ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Б.Е. ПАТОНА. 3-7 сентября 2019 года, Томск, Россия. – Томск, 2019 – 262 с.

В сборнике докладов, для обсуждения, представлен широкий спектр научно-технических вопросов, в том числе создания нового класса материалов, предназначенных для производства и ремонта высокоответственных конструкций, техники специального назначения, эксплуатируемых в условиях экстремальных нагрузок и естественно низких климатических температур Крайнего Севера и Арктики, нового поколения сварочного оборудования и инновационных технологий монтажа и ремонта. Большое внимание в докладах уделено вопросам надежности конструкций и техники при её эксплуатации в условиях низких климатических температур.

Материалы сборника докладов могут представлять интерес для широкого круга специалистов в области современного физического материаловедения, гидродинамики, химии и механики деформируемого твердого тела, надежности и техногенной безопасности, вопросов управления быстропротекающими процессами формирования неразъемных соединений при создании конструкций ответственного назначения.

Редактор сборника Материалов конференции,
Профессор, доктор технических наук Юрий Сараев.
Институт физики прочности и материаловедения
litsin@ispms.tsc.ru

Редакционная коллегия предупреждает, что за содержание представленной информации ответственность несут авторы докладов.

*Мероприятие проведено при финансовой поддержке:
Соглашение № 075-02-2019-1515 от 14.06.2019 г.*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ Абдурахманов Р.У.....	17
ВЫБОР КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ Абдурахманова А.Р.....	20
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ МИКРОСВАРКЕ Акболатов Е.Ж., Слободян М.С., Киселев А.С., Коровиков А.Г.....	22
THE EFFECT OF PRELOADING AND THE TIME OF THE ONSET OF A THERMAL EXPLOSION IN A POWDER SYSTEM ON THE PARAMETERS OF HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF INTERMETALLIC COMPOUND NI_3AL Akimov K.O., Ovcharenko V.E., Boyangin E.N., Kutenkov V.O., Figurko M.G.....	24
АБРАЗИВНАЯ И КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ СТАЛЕЙ 06X19H9T И FE-CR-TI-AL Алван Х.Л., Коробов Ю.С., Бессонов Н.О., Смоленцев М.С., Лежнин Н.В., Разиков Н.М., Разиков М.....	26
BEHAVIOR OF A WELDED-DEPOSITED STAINLESS STEEL TESTED AT DIFFERENT CAVITATION TEST CONDITIONS Alwan H.L., Korobov Yu.S., Soboleva N.N., Lezhnin N.V., Makarov A.V., Deviatiarov M.S., Elkind D.M.....	30
COMPARISON OF THE RESISTANCE TO CAVITATION AND ABRASIVE WEAR OF DEPOSITED LAYERS PREPARED FROM STEELS 06X19H9T AND FE-CR-TI-AL Alwan H.L., Korobov Yu.S., Bessonov N.O., Smolentsev M.S., Lezhnin N.V., Razikov N.M., Razikov M.....	32
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ Алрухайми А.Г., Иванов М.А.....	34
USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY FOR MODELING AND OPTIMIZING THE MAXIMUM TENSILE STRENGTH IN FRICTION STIR WELDING- COMPREHENSIVE STUDY RAHEEM Al-Sabur R., Slobodyan M.S.....	35
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ Анахов С.В., Матушкин А.В., Пыкин Ю.А.....	36
ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧИСТОВОЙ РЕЗКИ НОВЫМИ ПЛАЗМАТРОНАМИ Анахов С.В., Пугачева Н.Б., Гузанов Б.Н., Быкова Т.М.....	38
ОПЫТ СВАРКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И УСТРОЙСТВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ Андреев С.А., Табакин Е.М., Каплин А.В.....	40

О МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АБРАЗИВНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ Ан И–Кан, Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н., Швец А.С.....	42
ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АТОМОВ АЗОТА И УГЛЕРОДА Астафурова Е.Г., Астафуров С.В., Майер Г.Г., Тумбусова И.А.....	44
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ Афанасьев Н.Ю.....	45
ИМПУЛЬСНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА СПЛАВА ZR-1%NB Балашова К.А., Скрипко С.И., Слободян М.С.....	46
ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ Бартенев И.А.....	47
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ЛЕЖАЧИМ ЭЛЕКТРОДОМ С ЛЕГИРУЮЩЕЙ Fe-Mn ШИХТОЙ Бартенев И.А.....	49
ВЫБОР ТОЛЩИНЫ СВАРНОГО ШВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ СТЫКОВЫХ И УГЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ Бендик Т.И.....	51
ОЦЕНКА РИСКА - КЛЮЧ К СОЗДАНИЮ БЕЗОПАСНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА В ТИТАНОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ Бондаренко Ю.К., Логинова Ю.В., Ковальчук О.В., Артюх К.О.....	54
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНОЙ СБОРКИ Бочарова О.А., Тынченко В.С., Мурыгин А.В., Бочаров А.Н., Орешенко Т.Г.....	57
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НАГРЕВА НА ДИНАМИКУ СИНТЕЗА КОМПОЗИТОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ Букрина Н.В., Князева А.Г.....	59
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВСТАВКИ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ, СФОРМИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКОЙ, ДЛЯ СВАРКИ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛЕЙ Э76 И 110Г13Л Буренкова Т.А., Любар А.С., Федорино А.С., Никулина А.А., Рашковец М.В.....	61
ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА ПРИ АДДИТИВНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ Буров В.Г., Огнева Т.С., Дульбеева О.Н.....	63
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ	

Бушуева Е.Г., Сапина А.Ф., Батаев В.А.....	64
ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА РОСТ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СЛОЯ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	
Витошкин И.Е., Никулина А.А., Маликов А.Г.....	66
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	
Владимиров А.В., Травкин П.А.....	68
МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 09Г2С, ДОБАВЛЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА С НАНОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ КАРБОНИТРИДА ТИТАНА	
Гальченко Н.К., Самарцев В.П., Колесникова К.А., Власов И.В., Панин С.В., Яковлев А.В.....	70
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ	
Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В., Шишигина А.С.....	72
ВЛИЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЛЮСОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ АЛЮМИНИЯ	
Герасимов Е.А., Жилин П.В.....	74
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ ТРЕНИЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
Глуховской С.В., Михеев Р.С., Коберник Н.В.....	75
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА	
Голиков Н.И., Максимова Е.М., Сараев Ю.Н.....	76
ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПРИ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР	
Голиков Н.И., Сидоров М.М.....	78
СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ	
Голиков Н.И., Сидоров М.М., Сараев Ю.Н.....	80
МЕТОДИКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Голиков Н.И., Сидоров М.М., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П., Литвинцев Н.М., Семенов С.В.....	82
ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ	

Гончаров Н.Г., Зорин Е.Е., Юшин А.А., Пономарёв П.А.....	83
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 20 И 12Х18Н10Т	
Гончаров А.Л., Марченков А.Ю., Терентьев Е.В., Жмурко И.Е., Слива А.П.....	84
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕРМОЭДС КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ	
Гончаров А.Л., Чулкова А.В., Родякина Р.В., Драгунов В.К., Чулков И.С.....	86
УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ИМПУЛЬСА ТОКА ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ	
Гордынец А.С., Киселев А.С., Скрипко С.И.....	87
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ	
Гридасова Е.А.....	88
МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ НАПЛАВКИ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОГО ГОРЕНИЯ ДУГИ	
Гриняев К.В., Дитенберг И.А., Князьков А.Ф., Гаврилин А.Н., Корчагин М.А., Князьков С.А., Смирнов И.В.....	90
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ	
Гуденко А.В., Слива А.П., Щербаков А.В., Драгунов В.К., Горячкина М.В.....	91
ОСОБЕННОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ	
Гусарова А.В., Чумаевский А.В., Гурьянов Д.А., Калашников К.Н., Калашникова Т.А.....	92
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НОВЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК СИСТЕМЫ Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo	
Гусев А.И., Осетковский И.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е.....	93
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН УСТОЙЧИВОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ	
Данилов В.И., Абабков Н.В.....	96
МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПРОБЕ ТЕККЕН	
Дербенев Д.И., Иванов М.А.....	97
НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАЦИОНАЛЬНОМУ ПОСТРОЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛС	

Драгунов В.К., Гончаров А.Л.....	99
ОСОБЕННОСТИ НАПЛАВКИ И НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАБОЧИЕ ОРГАНЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН	
Евлампов В.Н., Жилин П.Л., Кошурина А.А., Углов Н.С.....	100
ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛОВ АЛЮМИНИЙ-СТАЛЬ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	
Елисеев А.А., Рубцов В.Е., Калашникова Т.А.....	101
УПРОЧНЕНИЕ КАРБИДОМ БОРА ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ	
Еремин Е.Н., Лосев А.С., Пономарев И.А., Бородихин С.А., Маталасова А.Е...	102
ОСОБЕННОСТИ СВАРИВАЕМОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ	
Ефименко Л.А., Рамусь А.А., Уткин И.Ю.....	104
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60 НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	
Жарков С.В., Степанов П.П., Кархин В.А.....	105
ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СВАРКИ И НАПЛАВКИ С ПОДОГРЕВОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ	
Жилин П.Л., Герасимов Е.А.....	107
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	
Зайцев Н.Л.....	109
К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В ТРУБОПРОВОДАХ	
Зайцев Н.Л., Сильвестров С.А.....	111
К ВОПРОСУ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХРУПКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ	
Зайцев Н.Л.	113
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ	
Зимоглядова Т.А., Егорова А.С., Гусева В.С.....	115
О ПЛАНОВО-ВЫСОТНОМ ПОЛОЖЕНИИ ППМГ «ХАТАССЫ-ПАВЛОВСК» ЧЕРЕЗ Р. ЛЕНА И ВЛИЯНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ	
Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г.....	117

ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ Иванов М.А., Тиньгаев А.К., Альрухайми А.Г.....	119
ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННОЙ БРОНЗЫ С ЛЕГКОПЛАВКОЙ ФАЗОЙ Иванов Н.В., Петров Р.Ю.....	121
ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛИ И СПЛАВОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ Игнатов А.Г.....	123
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ФОРМЫ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И СВОЙСТВ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ВЫПОЛНЕННОГО СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ Ильющенко А.Ф., Радченко А.А., Бубен Д.В., Шевцов А.И.....	126
ОРБИТАЛЬНАЯ СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ В ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ Илюшкин В.Ю.....	127
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ МЕТОДОМ Калашников К.Н., Чумаевский А.В., Утяганова В., Калашникова Т.А.....	128
FRICITION STIR WELDING OF Al-Mg-Si SHEETS BY TOOL WITH SEMI-SPHERICAL PIN Kalinenko A., Vysotskiy I., Malopheyev S., Mironov S., Kaibyshev R.....	129
TENSILE BEHAVIOR OF FRICTION-STIR WELDED Al-Mg-Si ALLOY Kalinenko A., Vysotskiy I., Malopheyev S., Mironov S., Kaibyshev R.....	129
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОСТА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПРОСЛОЕК В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ Карманова А.Е., Гирш А.В., Кучумова И.Д., Огнева Т.С.....	130
ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ARC КЛАССА Карпов И.Г., Мельников П.В., Кащенко Д.А.....	132
СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ Киселев А.С., Гордынец А.С.....	135
МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ СРЕДНИХ ТОЛЩИН Козырев Е.В., Иванов М.А.....	136
ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКИХ СВАРНЫХ ШВОВ В СУДОКОРПУСНЫХ	

<p>КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН</p> <p>Козырев Е.В., Штальман А.В., Олейничук В.И., Фролов М.А.....</p>	137
<p>ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ ФЕРРОХРОМА</p> <p>Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Прудников А.Н., Белов Д.Е.....</p>	139
<p>МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ППМГ ЧЕРЕЗ Р. ЛЕНА МЕТОДОМ ПРОФИЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</p> <p>Корнилова З.Г., Яковлев Ю.А., Антонов А.А.....</p>	141
<p>К 30-ЛЕТИЮ ООО "КОМПОЗИТ" - ПЕРВОГО НА УРАЛЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ И УПРОЧНЕНИЮ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ</p> <p>Коротков В.А.....</p>	143
<p>ШАДРИНСКИЙ ЭЛЕКТРОДНЫЙ ЗАВОД. ПРОИЗВОДИТЕЛЬ САРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ</p> <p>Корчанов А.Н.....</p>	146
<p>ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ</p> <p>Кочергин С.А.....</p>	147
<p>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ TIG СВАРКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ</p> <p>Кравченко А.С.....</p>	148
<p>ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА АРГОННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТОНКОЛИСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ</p> <p>Кравченко А.С.....</p>	149
<p>РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ И СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ</p> <p>Крекулева Р.А., Сараев Ю.Н., Семенчук В.М., Черепанов Р.О., Безгинов Р.О.....</p>	152
<p>ЦИФРОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА</p> <p>Крекулева Р.А., Сараев Ю.Н., Семенчук В.М., Черепанов Р.О., Безгинов Р.О.....</p>	153
<p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО КОМПОЗИТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ИЗГИБ</p> <p>Крылова Т.А., Чумаков Ю.А.....</p>	154
<p>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СВАРОЧНЫХ И НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ</p>	

Крюков Р.Е.....	156
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЛОЯ	
Кузнецов М.А., Крампит М.А., Крампит А.Г., Зеленковский А.А.....	158
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО ПЯТНУ НАГРЕВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ	
Курашкин С.О., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н.....	160
ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ТИТАНОВЫХ ПЛАСТИН В МИКРО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	
Курган К.А., Устинов А.М., Безухов К.А., Клопотов А.А., Власов Ю.А., Абзаев Ю.А., Потекаев.....	162
РИСК-АНАЛИЗ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
Лепихин А.М., Чернякова Н.А.....	163
РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	
Лихачев А.В., Кийченко Т.С., Лихачев Н.А.....	164
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ С ОСНОВНЫМ ПОКРЫТИЕМ	
Лопухов Ю.И., Даумова Г.К., Бочени В.И.....	166
ДВУХСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ В ЭЛЕКТРОДАХ УОНИ 13/ 55	
Лопухов Ю.И., Даумова Г.К.....	168
ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПРОЧНИЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС	
Люхтер А.Б., Печников И.С., Гоц А.Н.....	170
ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СТАЛИ ЧС-82	
Люхтер А.Б., Палкин П.А., Ильин В.А.....	172
ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА	
Люхтер А.Б., Палкин П.А., Завитков А.В.....	173
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ	
Люшинский А.В., Баранов А.А.....	174
КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1420	
Маликов А.Г., Оришич А.М., Карпов Е.В.....	175

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ Ti-AL-CR, ПОЛУЧЕННЫХ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКОЙ	177
Матц О.Э., Лазуренко Д.В., Кузьмин Р.И., Рашковец М.В., Чучкова Л.В.....	
АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР	178
Махутов Н.А., Макаренко И.В., Макаренко Л.В.....	
МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ	179
Махутов Н.А., Одинцев И.Н., Иноземцев В.В., Плугатарь Т.П., Счастливец А.Б.....	
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	180
Медведев С.В.....	
ВЛИЯНИЕ АЗОТА НА СТРУКТУРУ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА	183
Мейстер Р.А., Токмин А.М., Падар В.А.....	
ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАСОЧНОЙ ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	185
Мельников Д.М.....	
Порошковая проволока на основе пыли газоочистки силикомарганца	186
Михно А.Р., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Попова М.В.....	
РАЗРАБОТКА НОВЫХ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	187
Михно А.Р., Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Козырева О.А.....	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	189
Мкртычев О.В.....	
РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	190
Москвичев В.В.....	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЛАКИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	191
Мурашов Н.А., Пономаренко Д.В., Деркач А.П.....	

СООТНОШЕНИЕ ЭНЕРГИЙ СИЛОВОГО И ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКЕ С ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЖЕНИЕМ Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л., Рогозин Д.В.....	192
ГИБРИДНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ Неулыбин С.Д., Щицын Ю.Д., Хомутинин И.С.....	193
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПЕРВИЧНОЙ МАКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ЭЛС Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М.....	195
ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Асташинский В.М., Углов В.В., Соболевский С.Б., Оковитый В.В.....	198
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВЫХ БИМЕТАЛЛОВ, ОСНОВАННЫХ НА РАСПЛАВЛЕНИИ ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ И ОБРАЗОВАНИИ СОЕДИНЕНИЯ СЛОЁВ В ТВЁРДОЙ ФАЗЕ Первухин Л.Б., Первухина О.Л., Шишкин Т.А.....	199
NON-VACUUM ELECTRON-BEAM SURFACING OF COATINGS WITH THE ULTRAFINE STRUCTURE Perovskaya M.V., Poletika I.M., Shmakov V.V.....	200
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НОВЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ Петришин Г.В., Быстренков В.М., Сидоров В.А.....	201
ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ САМОФЛЮСУЮЩИМИСЯ ПОРОШКОВЫМИ СМЕСЯМИ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ И КАРБИДА ВОЛЬФРАМА Петришин Г.В., Пантелеенко А.Ф., Быстренков В.М., Мельников Д.В.....	203
ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ НОВЫМИ САМОФЛЮСУЮЩИМИСЯ ПОРОШКОВЫМИ СМЕСЯМИ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ Петришин Г.В., Пантелеенко Ф.И., Пантелеенко Е.Ф.....	205
ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ШТУЦЕРОВ И ПАТРУБКОВ МАЛОГО (ДО 80 ММ) ДИАМЕТРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ Полетаев Ю.В., Щепкин В.В.....	207
ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ НИКЕЛИД ТИТАНА Потекаев А.И., Гюнтер С.В., Сапрыкин А.А., Ибрагимов Е.А., Клопотов А.А., Галсанов С.В., Дубовиков К.М.....	208

EBSD-АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО ШВА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ МЕДНОЙ ВСТАВКОЙ: CONFERENCE SERIES Пугачева Н.Б., Мичуров Н.С., Сенаева Е.И.....	210
ЭЛЕКТРОННЫЕ СВАРОЧНЫЕ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ: ВАКУУМНОЕ И ВНЕВАКУУМНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ Ремпе Н.Г.....	212
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ С ВОДЯНОЙ ЗАВЕСОЙ СОПЛА Рогозин Д.В., Соловьев М.А., Маслов И.В.....	213
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СТРУКТУРИЗАЦИИ В АДГЕЗИОННОМ СЛОЕ В ПРОЦЕССЕ ЛАМИНИРОВАНИЯ Сайфуллин Э.Р., Князева А.Г.	215
МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЭЛЕКТРОДАМИ Т- 590 И ЭН-60М НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ СТАЛИ 09Г2С. СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ПОКРЫТИЯ ПРИ НАПЛАВКЕ НА РЕЖИМЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В., Семенчук В.М.....	217
ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ Сараев Ю.Н., Гладковский С.В., Перовская М.В., Семенчук В.М., Непомнящий А.С.....	219
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Семенчук В.М., Непомнящий А.....	220
LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY FOR IN-SITU ONLINE MULTIELEMENTAL ANALYSIS OF WEAR RESISTANT COATINGS DURING ITS TREATMENT BY COAXIAL LASER CLADDING Sdvizhenskii P.A., Lednev V.N., Tretyakov R.S., Grishin M.Ya., Asyutin R.D., Pershin S.M.....	222
ВЛИЯНИЕ ВИДА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВ Семухин Б.С.....	223
ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦЕВОМ СТЫКЕ РАЗНОТОЛЩИННЫХ ТРУБ Сидоров М.М., Голиков Н.И.....	225
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУР	

Скрипняк В.А.....	227
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ТОЛЩИНОЙ 60 ММ Слива А.П., Гончаров А.Л., Терентьев Е.В., Харитонов И.А., Драгунов В.К.....	228
ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СПЛАВА ZR-1%NB Слободян М.С., Киселев А.С.....	230
ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ НИЖЕ НОРМАТИВНЫХ Старостин Н.П., Аммосова О.А.....	232
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ Стаценко В.Н., Сухорада А.Е., Лелюхин В.Е.....	234
ЛАЗЕРНАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Тарева А.А., Мельников Д.М., Мельникова М.А., Зойе Мьят	235
АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ Терентьев Е.В., Драгунов В.К., Слива А.П., Гончаров А.Л., Марченков А.Ю.....	238
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ А306.13 Тынченко В.С., Мурыгин А.В., Петренко В.Е.....	239
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ В ПОКРЫТИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ИХ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА Урбанович Н.И., Бендик Т.И., Барановский К.Э., Розенберг Е.В.....	241
РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ ПРИЖИМОВ Хайбрахманов Р.У., Коробов Ю.С., Биленко Г.А.....	242
РАЗРАБОТКА СПОСОБА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТАВОК Харитонов И.А., Драгунов В.К., Гончаров А.Л., Мартынов В.Н., Портнов М.А...	244
ОЦЕНКА РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ Чернякова Н.А.....	245
ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА МАРГАНЦА В СОСТАВЕ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ЗДОРОВЬЕ СВАРЩИКА И ПУТИ ЕГО СНИЖЕНИЯ Чинахов Д.А., Ильященко Д.П., Чинахова Е.Д.....	246

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И АДГЕЗИОННОГО ТРЕНИЯ Чумаевский А.В., Гусарова А.В.....	248
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ Чумаевский А.В., Гусарова А.В.....	249
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ Чумаевский А.В., Гусарова А.В., Калашников К.Н., Калашникова Т.А.....	250
АДДИТИВНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТОДОМ ЕВМ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ СТАЛИ 12Х18Н9Т И ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 Чумаевский А.В., Калашников К.Н., Гусарова А.В., Калашникова Т.А.....	251
ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНО-ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ Чумаевский А.В., Калашников К.Н., Гусарова А.В., Калашникова Т.А.....	252
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА Чумаевский А.В., Утяганова В.Р., Осипович К.С., Калашников К.Н., Калашникова Т.А.....	253
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ Чумаков Ю.А., Крылова Т.А.....	254
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПЛАВЛЯЕМОГО ПОРОШКА КАРБИДА БОРА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Чучкова Л.В., Белов А.С., Ложкина Е.А., Матц О.Э.....	255
ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ Шамов Е.М., Евтихийев Н.Н., Шиганов И.Н., Бегунов И.А.....	256
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ПЛАСТИН ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНОЙ ВСТАВКИ Шапеев В.П., Черепанов А.Н., Исаев В.И.....	258
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ БЕЗ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Кратько С.Н., Крюков Р.Е., Михно А.Р.....	259
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ Эмурлаева Ю.Ю.....	260

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Р.У. АБДУРАХМАНОВ

Казахстанская ассоциация сварки «Kazweld» г. Астана, Республика Казахстан

E-mail: r_abdurakhmanov@mail.ru

Исследование процессов первичной кристаллизации металла швов и сварных точек проводили на алюминии марок А995, А99, А85, А7, АД1 и алюминиевых сплавах АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, 1201 и 1420 толщиной 0,8 мм. Часть экспериментов выполнили на образцах толщиной 1,2, 1,6, 1,8 и 2,0 мм.

Проведенные исследования показали, что первичная структура сварных швов и точек на алюминии марок А995, А99, А85, А7 и АД1 имеет типичное столбчатое строение. Кристаллизация сварного шва алюминия А995 и А99 при ширине ванны менее 3 мм и сварной точки диаметром менее 2,5 мм осуществляется путем перемещения плоского фронта. При увеличении геометрических размеров сварных швов и точек плоский фронт кристаллизации распадается и переходит в ячеистый. Распад плоского фронта кристаллизации происходит на участках металла, прилегающих к оси сварного шва или к центру точки. Дендритная кристаллизация не наблюдается в сварных швах и точках алюминия А995 и А99 даже при значительном увеличении их размеров.

Фронт кристаллизации при затвердевании сварных швов алюминия марок А7 и АД1 у линии сплавления имеет плоское строение с небольшой протяженностью в направлении к оси шва, равной соответственно 180...270 и 50...80 мм. Затем плоский фронт кристаллизации сменяется ячеистым, который сохраняется в алюминии А7 вплоть до оси шва независимо от его геометрических размеров, а в алюминии АД1 при ширине сварочной ванны порядка 5,8 мм и более ячеистый фронт кристаллизации сменяется ячеисто-дендритным. При этом резко увеличиваются поперечные размеры первичных кристаллитов и размеры структурных элементов кристаллитов. Резкое изменение первичной структуры сварного шва на алюминии АД1 обнаруживается при значительном его расширении. Расширение шва до 9 мм и более приводит к переходу ячеисто-дендритного фронта кристаллизации в дендритный. При этом расстояние между осями дендритов достигает 25...40 мм.

В сварных швах алюминия и его сплавов шириной более 3,5...4,0 мм наблюдается появление осевой группы кристаллитов. В сварных швах алюминия марок А7 и АД1 она имеет ячеистое строение, в сварных швах алюминиевого сплава АМц – ячеистое и ячеисто-дендритное и дендритное строение, а в сварных швах сплавов АМг2 и АМг3 – ячеисто-дендритное и дендритное строение, а в сварных швах сплавов АМг6, 1201 и 1420 – дендритное строение. Осевая группа кристаллитов в сварных швах алюминия АД1 всегда имеет ячеистое строение. Даже при сравнительно большой ширине ванны (6...9 мм) ячеистое строение сохраняется, в то время, как столбчатые кристаллиты, растущие от линии оплавления в непосредственной близости от осевой группы первичных кристаллитов, приобретают ячеисто-дендритное и дендритное строение. В широких сварных швах алюминиевого сплава АМц вблизи осевой группы столбчатые кристаллиты, растущие под значительным углом к оси шва, приобретает ячеисто-дендритное и дендритное строение, сама осевая группа кристаллитов имеет ячеистое строение, местами с элементами ячеисто-дендритной структуры. Таким образом, кристаллиты, растущие от линии сплавления в широких швах вблизи от оси, имеют тенденцию к существенному огрублению внутренней структуры по сравнению с осевой группой кристаллитов, которая ориентирована по оси шва или же под небольшим углом к ней.

Первичная кристаллизация сварных швов и точек происходит в типично неравновесных условиях. Фронт кристаллизации при затвердевании сварного шва движется неравномерно, возможны его остановки и оплавления.

Средняя скорость кристаллизации сварной точки по мере перемещения межфазной поверхности от линии сплавления к центру вначале возрастает, а затем практически не

меняется. Средняя скорость кристаллизации сварной точки зависит от марки алюминиевого сплава, условий теплоотвода и времени проплавления. С уменьшением диаметра точки и увеличением сварочного тока средняя скорость кристаллизации возрастает.

Зависимость ширины затвердевающего слоя металла при кристаллизации сварной точки алюминия и его сплавов от времени в общем случае принимает линейный характер.

Периодичность кристаллизации и слоистость швов обусловлена внешними, а не внутренними факторами. Периодичность появления слоев кристаллизации в сварных швах при сварке неплавящимся электродом в случае стабильного горения дуги совпадает со сменой полярности переменного тока или частотой пульсации выпрямленного тока. Одной из причин образования слоистости в сварных швах является волновой характер отвода тепла в основной металл, связанный с пульсацией тепловой мощности дуги и сохраняющийся при определенных условиях после отключения источника питания.

Закономерность формирования слоистой химической неоднородности определяется, в основном, характером изменения скорости кристаллизации и факторами ответственными за формирование концентрационного уплотнения перед движущейся межфазной поверхностью.

Структура фронта кристаллизации при сварке алюминия и его сплавов определяется погонной энергией, содержанием примесей и легирующих элементов в металле и сплаве. С повышением погонной энергии, а также содержания примесей и легирующих элементов устойчивость фронта кристаллизации снижается.

Первичная структура сварных швов алюминия и его сплавов является типично столбчатой с внутренним ячеистым, ячеисто-дендритным или дендритным строением. В сварных швах алюминиевого сплава 1420 по оси возможно образование равноосных кристаллитов. Равноосные кристаллиты образуются также возле центра сварных точек сплавов АМг2, АМг3, АМг6, 1201 и 1420. С увеличением толщины образцов и увеличением диаметра точек увеличиваются размеры равноосной зоны.

Величина структурных элементов кристаллитов в сварных швах и точках алюминия и его сплавов, за исключением алюминия высокой чистоты, закономерно повышается по мере удаления от линии сплавления. С увеличением размеров швов и точек происходит повышение размеров структурных элементов кристаллитов особенно в центральных областях швов (точек) сложнолегированных сплавов. Чем меньше легирующих элементов и примесей, тем слабее влияет погонная энергия на внутреннее строение первичных кристаллитов.

Ячейки в сварных швах и точках алюминия А7, АД1 и алюминиевого сплава АМц, по-видимому, на стадии распада и подчиняются поэтому особенностям дендритной кристаллизации, для которой характерен прямолинейный рост и необязательная ортогональность изотермам кристаллизации.

Установлены следующие механизмы зарождения первичных кристаллитов: гетерогенное зарождение на готовых центрах кристаллизации в виде тугоплавких частиц, зарождение на полуоплавленных ячейках и ветвях дендритов, зарождение в расплаве ванны на газовых пузырьках.

В процессе первичной кристаллизации срабатывают следующие механизмы роста: эпитаксиальный рост кристаллитов, кристаллизация через двухфазную зону, слоисто-столбчатая кристаллизация, конкурентный рост столбчатых кристаллитов, столбчатая кристаллизация с вращением неразвитых равноосных и столбчатых кристаллитов, столбчатая кристаллизация с закономерным изменением кристаллографического направления роста.

При импульснодуговой сварке первичная структура сварного шва периодически изменяется в соответствии с частотой следования импульсов тока, в частности наблюдается либо периодическое чередование структуры фронта кристаллизации, либо периодическое изменение размеров структурных элементов кристаллитов, либо и то, и другое. В сварном шве сплава 1420 возможно периодическое чередование двух участков: столбчатого и равноосного. Столбчатый участок формируется в условиях высокого градиента температуры

у межфазной поверхности, равноосный участок – во время паузы в условиях более низкого градиента температуры.

ВЫБОР КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.Р. АБДУРАХМАНОВА

Казахстанская ассоциация сварки «Kazweld», г. Астана, Республика Казахстан
E-mail: info@kazweld.kz

Одними из основных компонентов, используемых в покрытии сварочных электродов, являются карбонаты, которые применяют в виде минерального сырья. Чаще всего в этой роли выступает мрамор, который используют, например, в покрытиях таких известных электродов как УОНИ 13/55, МР-3 и др.

Основным недостатком мрамора является его относительно высокая твердость, которая негативно отражается на работе электроообмазочного узла, приводя к преждевременному износу трущихся поверхностей цилиндра и поршня. Потому его замена на другой минерал того же химического состава, но более мягкого может способствовать повышению долговечности работы электроообмазочного пресса.

Карбонат кальция в природе встречается в виде трех минералов, а именно: мрамора, известняка и мела. Мрамор представляет собой метаморфическую породу с зернистой кристаллической структурой характерной кварцитам. В результате измельчения он образует зернистый сыпучий порошок с абразивной поверхностью и, как следствие, обладает низкой пластичностью. Известняк, в отличие от мрамора, представляет собой органическую породу и состоит в основном из скелетных остатков (раковин) вымерших морских животных. При измельчении известняк дает тонкодисперсный порошок и при замешивании в жидком стекле образует пластическую мокрую смесь, улучшающую работу электроообмазочного агрегата.

Мел, в отличие от других карбонатов кальция, является аморфным веществом, которое легко поддается измельчению. При измельчении мел дает мелкодисперсный порошок и при замешивании в жидком стекле образует высокопластичную мокрую смесь, улучшающую работу электроообмазочного пресса.

Таким образом, мел, в отличие от мрамора, выполняет в составе электродного покрытия функции пластифицирующего компонента. Кроме того, мел, как мрамор и известняк, выполняет функции газообразующего, шлакообразующего и стабилизирующего компонента.

Рутиловый концентрат вводится в состав электродного покрытия в качестве шлакообразующего компонента. Его введение способствует улучшению сварочно-технологических свойств электродов. С точки зрения химического состава, рутил является диоксидом титана. Диоксид титана – это амфотерный оксид четырех валентного титана, который является основным продуктом титановой индустрии. Температура плавления диоксида титана составляет 1843 °С, температура кипения - 2972 °С и плотность – 4,23 г/см³. Благодаря своим свойствам диоксид титана используется при производстве широкого круга товаров различного назначения. Так, более 50% всего объема диоксида титана идет на получение товаров лакокрасочной отрасли (титановые белила), поскольку диоксид титана обладает отличными красящими свойствами. Чистый диоксид титана – это бесцветные кристаллы, которые желтеют при нагревании, но обесцвечиваются после охлаждения.

Диоксид титана известен в виде нескольких модификаций. Кроме рутила (кубическая сингония), анатаза (тетрагональная сингония) и брукита (ромбическая сингония), получены две модификации высокого давления: ромбическая IV и гексогональная V. Гигроскопичность – это одно из свойств диоксида титана, особенно анатаза. Свойства рутила и анатаза имеют различия. Рутил, в отличие от анатаза быстрее взаимодействует с примесями и образует твердые растворы.

Титановые белила, в отличие от рутилового концентрата, способствуют улучшению прессуемости электродов. При замешивании порошка титановых белил в жидком стекле образуется пластичная мокрая смесь, улучшающая работу электроообмазочного агрегата, что сопровождается повышением эксплуатационной надежности и долговечности электроообмазочного пресса. Введение титановых белил в состав электродного покрытия

способствует, как и введение рутилового концентрата, улучшению сварочно-технологических свойств электродов.

В состав электродных покрытий общего назначения, разработанных в Институте электросварки им. Е.О. Патона, таких как АНО-3, АНО-4, АНО-18, АНО-19 и др., входит магнезит – минерал, состоящий из карбоната магния. По твердости он превосходит мрамор. После измельчения магнезит образует зернистый сыпучий порошок с абразивной поверхностью и, как следствие, обладает низкой пластичностью. Поэтому для облегчения работы электродообмазочного пресса магнезит желательнее заменить на доломит, который обладает меньшей твердостью. Доломит является природным минералом, химический состав которого соответствует смеси карбонатов кальция и магния. Доля каждого из карбонатов колеблется в зависимости от месторождения. Доломит выполняет в покрытии функции газообразующего, шлакообразующего и стабилизирующего компонента.

В состав электродных покрытий основного типа, таких как УОНИ-13/55, УОНИ-13/55 ФК, УОНИ 13/55 К, ИТС-4С входит кварцевый песок, который по твердости и абразивному действию превосходит все другие компоненты, используемые в производстве сварочных электродов. В этой связи производство электродов типа УОНИ 13/55 характеризуется быстрым износом оборудования. Поэтому для облегчения процесса прессования электродов следует кварцевый песок (природный силикат) заменить на полевой шпат (природный алюмосиликат), обладающий меньшей твердостью и не оказывающий сильного абразивного действия на электродообмазочный узел электродообмазочного пресса.

Полевой шпат, как и кварцевый песок, в составе электродного покрытия является шлакообразующим компонентом. Кроме того, полевой шпат, в отличие от кварцевого песка, является стабилизирующим компонентом, который повышает устойчивость горения сварочной дуги.

Химический состав жидкого стекла и его параметры (плотность, вязкость, силикатный модуль) оказывают существенное влияние на качество мокрой смеси и на прессуемость электродов. Натриевое жидкое стекло, благодаря своей дешевизне и высокой клеящей способности, широко используется при изготовлении сварочных электродов. Считается, что калиевое жидкое стекло по сравнению с натриевым обладает низкой клеящей способностью. Однако, проведенные нами исследования показали, что калиевое жидкое стекло при определенных параметрах способствует улучшению сварочно-технологических свойств электродов, что выражается, в частности, в более устойчивом и стабильном горении сварочной дуги.

При сушке электродов, полученных на основе калиевого жидкого стекла, интенсивно удаляется влага из покрытия и опасность возникновения трещин при этом уменьшается. Легкость удаления влаги благоприятно отражается на ее остаточном содержании в покрытии электрода, в частности, основного вида и, как следствие, в пониженном количестве диффузионного водорода в наплавленном металле. При этом на остаточное содержание влаги в покрытии электродов и на концентрацию диффузионного водорода в наплавленном металле оказывают влияние плотность и вязкость, а также силикатных модуль жидкого стекла. С уменьшением плотности и вязкости жидкого стекла, а также с повышением его силикатного модуля содержание остаточной влаги в покрытии основного вида и соответственно диффузионного водорода в наплавленном металле сокращаются. Растворы силикатов натрия, калия и других элементов в зависимости от модуля обладают при высыхании разной усадкой и разными прочностными характеристиками. Наименьшую усадку при высыхании дают жидкие стекла с высоким модулем. Снижение величины усадки благоприятно влияет на сушку и прокалку электродов, т.к. при этом снижается склонность к трещинам в покрытиях. Жидкие стекла с низким модулем не обладают клеящими свойствами. Клеящие свойства проявляются у жидких стекол с модулем больше двух. Высокомодульные жидкие стекла более предпочтительны в производстве сварочных электродов, т.к. их использование позволяет сохранить необходимые свойства у ферросплавов.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ МИКРОСВАРКЕ

Е.Ж. АКБОЛАТОВ¹, М.С. СЛОБОДЯН², А.С. КИСЕЛЕВ², А.Г. КОРОВИКОВ²

¹ Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Республика Казахстан

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: akhbolatov@nnc.kz

При контактной точечной сварке тонкостенных деталей стабильность качества соединений зависит от характера выделения тепла, который определяется особенностями изменением общего сопротивления металла между электродами. В связи с этим возможность прогнозирования значений этого сопротивления для конкретного периода протекания тока является актуальной задачей.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования по определению влияния алгоритма изменения тока в сварочной цепи на этапе подогрева, а также усилия сжатия и геометрии рабочей поверхности электродов, на величину общего сопротивления металла между электродами. Для этой цели использовали тонкостенные детали в одном случае из циркониевого сплава Э110 (0,25+0,25 мм), а в другом – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (0,3+0,3 мм). Эксперименты проводили на специальном сварочном комплексе, который состоит из источника питания ИПТКМ-10 и механизма сжатия контактной машины МТТ-02. Для регистрации амплитудно-временных параметров режима сварки использовали цифровой осциллограф RIGOL MSO 1074. С целью стабилизации сопротивления между электродами посредством подогревающего импульса тока и определения его рациональных амплитудно-временных параметров был проведен многофакторный эксперимент. Его схема приведена на рисунке 1. Диапазоны изменения усилия сжатия электродов и радиуса рабочей поверхности приведены в таблице 1. Алгоритмы модуляции подогревающего импульса тока представлены на рисунок 2. При одном и том же интегральном тепловложении они отличались алгоритмом увеличения тока: дискретным (режимы 1 и 3) и ступенчатым (режимы 3 и 4), а также резким (рисунок 2, а) и плавным (рисунок 2, б). Сопротивление участка между электродами вычисляли по закону Ома с использованием измеренных значений тока и напряжения (по десять раз для каждой комбинации входных параметров). Данные предварительно обрабатывали методом «сглаживания по трем точкам» с помощью ПО MS Excel и Statistica. Начальное сопротивление между электродами определяли через 0,5 мс (с целью завершения переходных процессов во вторичном контуре) после включения тока 125 А. Конечное сопротивление оценивали непосредственно перед отключением тока по истечении 3,5 мс в соответствии с циклограммами. Также была проведена статистическая обработка этих данных, в частности определили дисперсию и среднее значения.

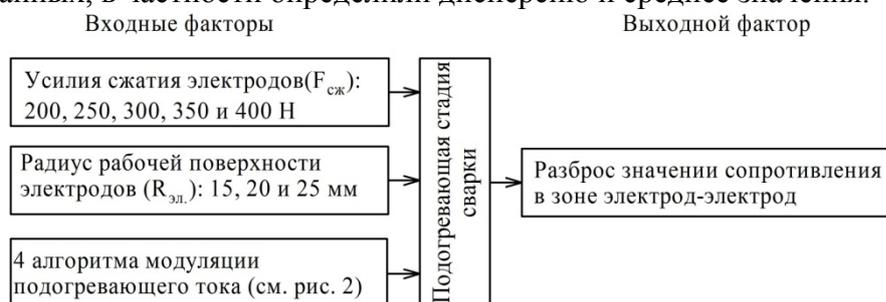


Рисунок 1 – Схема многофакторного эксперимента

Полученные результаты были сопоставлены с выполненными теоретическими расчетами по формулам величины общего сопротивления металла между электродами, что позволило сделать вывод о невозможности достоверно предсказывать его значения. Кроме того, не выявлено явной зависимости между усилием сжатия электродов и начальным значением величины общего сопротивления металла между электродами. Взаимосвязь между радиусом сферы рабочих поверхностей электродов, средними значениями сопротивлений и их дисперсий выражена в меньшей степени при использовании образцов из

нержавеющей стали. Для циркониевого сплава средние значения снижает, но не влияет на разброс. Скорость нарастания тока подогревающего импульса не оказывает заметного влияния на стабилизацию значений общего сопротивления металла между электродами во всех исследованных случаях. Ступенчатое увеличение тока позволило существенно снизить разброс значений сопротивлений для деталей из циркониевого сплава. Для деталей из нержавеющей стали стабилизации значений общего сопротивления металла между электродами добиться не удалось, однако их разброс на завершающем этапе подогрева значительно уменьшается по сравнению с начальными значениями.

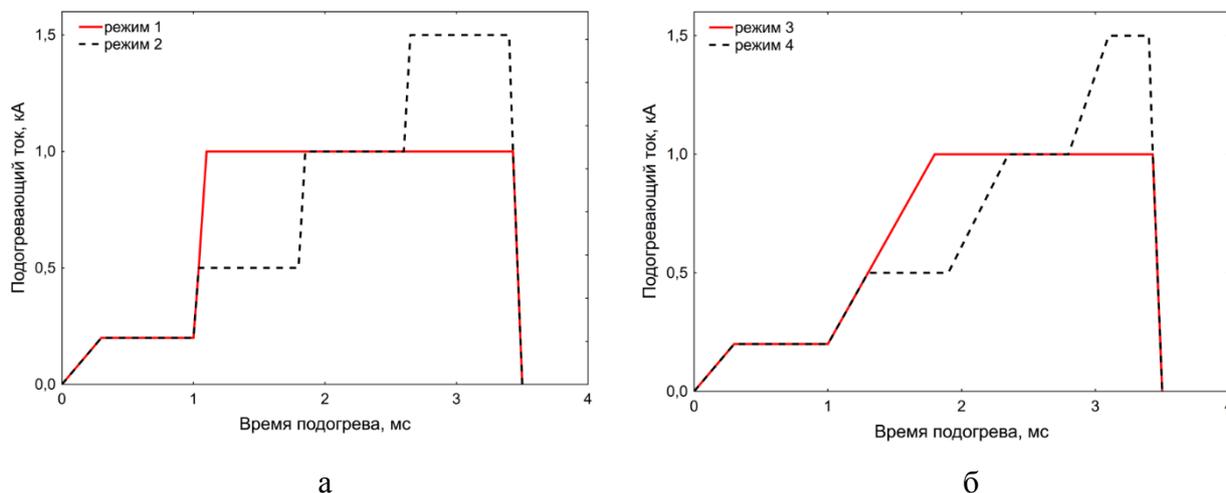


Рисунок 2 – Алгоритмы модуляции подогревающего импульса тока с дискретным (режимы 1 и 3) и ступенчатым (режимы 3 и 4): а) резким б) плавным повышением

Таблица 1 – Значения усилия сжатия и радиуса рабочей поверхности электродов, используемые в расчетах

Сила сжатия, Н	200			250			300			350			400		
Радиус рабочей поверхности электродов, мм	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25

THE EFFECT OF PRELOADING AND THE TIME OF THE ONSET OF A THERMAL EXPLOSION IN A POWDER SYSTEM ON THE PARAMETERS OF HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF INTERMETALLIC COMPOUND Ni₃Al

K.O. AKIMOV^{1,2}, V.E. OVCHARENKO¹, E.N. BOYANGIN¹, V.O. KUTENKOV¹, M.G. FIGURKO¹

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tomsk

²National Research Tomsk State University, Tomsk

E-mail: jeck2000@list.ru

As a basis for high-temperature alloys, the Ni₃Al intermetallic compound has a wide range of applications: in aircraft construction, in the space industry, in the production of tools, etc. Traditional methods of production, such as melting and casting, do not apply to the fabrication of many intermetallic compounds because of the large difference between the melting points of the constituent elements [1]. The intermetallic compound Ni₃Al having a high ordering energy. The ordered structure is maintained up to the melting point, therefore the intermetallic compound is characterized by extremely low values of plasticity and a high tendency to intercrystalline failure [2]. Its wider use is hindered by insufficient plasticity and, correspondingly, strength at elevated temperatures. Grinding grain structure intermetallic compounds, by intense plastic deformation is possible under conditions of volumetric exothermic reaction of self-propagating high-temperature synthesis of an intermetallic compound in a powder mixture of initial elements [3]. The thermophysical conditions of the volumetric reaction of the formation of the intermetallic compound in the powder mixture of the initial elements ensure the synchronism of the phase transformations simultaneously in the entire volume of the powder preform, which allows the consolidation of individual structural fragments of the high-temperature synthesis product at the time of the achievement of the crystallization of the intermetallic compound by the thermoreacting powder system and the formation of its grain structure.

The purpose of this work was to study the influence of key parameters of the self-propagating high-temperature synthesis process under the pressure of the intermetallic Ni₃Al compound in the thermal explosion regime of the (3Ni+Al) powder mixture on the formation of the grain structure and the strength of the synthesized intermetallic compound-the pre-pressure on the compact from the initial powder mixture in the reactor mold and the delay time applications to the product of high-temperature synthesis of pressure after the reduction in the process of heating the value of the preliminary pressure on a powder compact to a minimum. To this end, the process of intermetallic compound self-propagating high-temperature synthesis under pressure was realized on an automated technological stand based on a hydraulic press equipped with devices for high-frequency heating of a steel mold-reactor, a digital system for fixing the pre-pressure on the initial powder mixture in a mold-reactor and a timer for monitoring the application of pressure to the product high-temperature synthesis.

In this study Ni₃Al intermetallic compound was synthesized in the thermal explosion regime of compacts from a powder mixture of nickel (particle size ~ 2.0 μm) and aluminum (particle size ~ 1.0 μm) stoichiometric composition in a cylindrical mold-reactor with an internal cavity diameter of 58 mm. High-temperature synthesis of intermetallic compound under pressure in a powder mixture of stoichiometric composition was carried out on an automated hydraulic press equipped with devices for high-frequency heating of a steel mold, a temperature regulator for heating the powder compact, a digital manometer for controlling of pressure in the hydraulic system of the press main cylinder and a timer for switching the working stroke of the hydraulic press. The grain size was determined by random secant method with averaging over 150 measurements. The effect of control parameters on the average grain size of the Ni₃Al intermetallide samples was investigated.

The increase in the initial synthesis pressure to 120.4 MPa leads to a decrease in the average grain size in the samples to a minimum value of 7.6 μm, but with a further increase in the initial pressure, the grain size begins to increase. Decrease in the delay time leads of pressure application leads to an increase in the average grain size up to 0.5 s, then, at zero value of the pressure application delay time, the average grain size in the investigated Ni₃Al intermetallic compound

samples decreases to a minimum value of 7.6 μm . It was revealed that the smallest grain size corresponds to a zero-delay time of the compaction beginning and a preliminary pressure of 115.1 MPa.

Was revealed (Figure 1) that the minimum of average grain size is observed at the maximum values of the pressure decrease rate at the melting stage and the rate of pressure increase at the crystallization stage. It was found that an increasing of the pressure changing rate leads first to an increasing of the grain size, and then to its total decreasing by $\sim 56\%$ with a decreasing of the compaction start delay by $\sim 63\%$ with increasing preload on the initial powder compact, respectively.

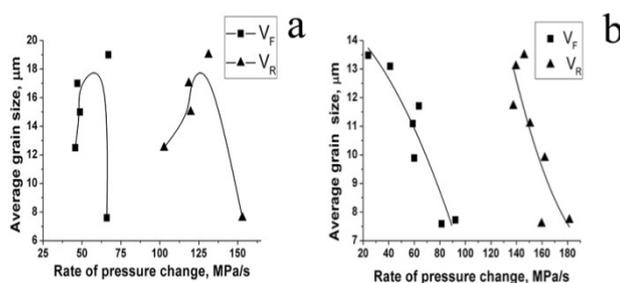


Figure 1 - Dependences of the average grain size in the samples of the synthesized Ni_3Al intermetallic compound on the pressure decreasing rate and the pressure increasing rate for different delay times of the compaction beginning (a), at different pre-pressures on the initial powder compact (b).

Conclusion

1. The barograms of the intermetallic compound high-temperature synthesis under pressure under conditions of the initial powder mixture continuous heating were obtained. These barograms allow the analysis of the Ni_3Al intermetallic compound synthesis reaction passage. Key synthesis parameters, such as the delay time of the start of compaction and the value of the preliminary pressure on the initial powder compact, significantly influence the passage of the synthesis process, which allows obtaining materials with given physicomechanical characteristics.
2. The decreasing of the delay time of the start of compaction and the increasing of the preliminary pressure value on the initial powder compact lead to an increasing of the pressure decreasing rate during melting and the rate of pressure increasing rate during crystallization, and, as a result, to a significant acceleration of the synthesis reaction.
3. The rate of melting and crystallization processes most influences the grain size of the final product of synthesis. An increasing of the synthesis reaction rate leads to a decreasing of the average grain size in the Ni_3Al intermetallic compound samples by an average of 70%. With the change in the nature of the behavior, the rate of change in pressure begins to decrease, grain growth begins in the final product of synthesis.

Acknowledgments

The study was carried out according to the basic research program of the Russian Academy of Sciences for 2017–2020 “Development of the scientific foundations for the creation of metal and composite materials with a hierarchically organized structure”, No. III.23.2.2.

References

1. Yeh C. and Sung W. Combustion Synthesis of Ni_3Al Intermetallic Compound in Self-Propagating Mode // *J. Alloy. Compd.* – 2004. – № 384. – P. 181-191.
2. Sikka V. et.al. Advances in processing of Ni_3Al -based intermetallics and applications // *Intermetallics.* – 2000. – № 8. – P. 1329-1337.
3. Sheng L. et.al. Microstructure and mechanical properties of Ni_3Al fabricated by thermal explosion and hot extrusion // *Intermetallics.* – 2009. – Vol. 17. – P. 572-577.

АБРАЗИВНАЯ И КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ СТАЛЕЙ 06X19H9T И Fe-Cr-Ti-Al

Х.Л. АЛВАН^{1,3}, Ю.С. КОРОБОВ^{1,2}, Н.О. БЕССОНОВ¹, М.С. СМОЛЕНЦЕВ¹, Н.В. ЛЕЖНИН², Н.М. РАЗИКОВ¹, М.Н. РАЗИКОВ¹

¹ Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

² Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург

³ Технический университет, г. Багдад, Ирак

E-mail: lefta.hussam@gmail.com

Аннотация. Стойкость наплавленных слоев к кавитационной эрозии и абразивному износу была изучена для сталей 06X19H9T и Fe-Cr-Ti-Al (Урал AS-3 и ППМ-6). Процесс дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в инертном защитном газе (TIG) использовали для нанесения этих материалов на подложку из углеродистой стали. Ультразвуковой вибрационный метод был использован для испытания кавитационной эрозии, в то время как испытание на истирание резинового колеса было использовано для испытания на абразивный износ. Критерии потери массы и скорость износа каждого материала в зависимости от времени испытаний были получены и обсуждены. Испытания на кавитацию и абразивный износ показали аналогичные результаты в отношении ППМ-6, так что среди всех наплавленных материалов ППМ-6 был лучшим по сопротивлению кавитации и истиранию. 06X19H9T продемонстрировал более высокое сопротивление кавитации, чем Урал AS-3, в то время как в отношении абразивного испытания Урал AS-3 был несколько лучше, чем 06X19H9T.

Ключевые слова: Абразивное изнашивание, износостойкость покрытий, порошковая и сплошная проволока, кавитация, наплавка.

Введения: Компоненты оборудования и металлургическое оборудование подвержены поломкам из-за износа, возникающего во время работы. Повреждения, вызванные износом, влияют на поверхность деталей, поэтому следует производить ремонт изношенных поверхностей. Это приводит к увеличению стоимости оборудования. Поэтому необходимы разработки материалов и технологий для защиты поверхности деталей и повышения износостойкости [1]. В исследовании были рассмотрены абразивный износ и ультразвуковая вибрационная кавитация применительно к наплавленным слоям из сталей 06X19H9T и Fe-Cr-Ti-Al. Износ, вызванный кавитацией, является реальной проблемой, которая возникает в жизненно важных компонентах, таких как крыльчатки насосов, лопасти турбины, штока гидроцилиндров и гребные винты. Кавитационный износ влияет на производительность и срок службы этих компонентов [2]. Ремонт поврежденных компонентов с помощью наплавленных материалов сваркой часто является целесообразным с экономической точки зрения. Абразивный износ также характерен для указанных выше деталей.

Материалы и методы исследования

Материалы: Две порошковые проволока системы легирования Fe-Cr-Ti-Al (Урал AS-3 и ППМ-6) и сплошная проволока 06X19H9T диаметром 1,6 мм были наплавлены дуговой сваркой неплавящимся электродом в аргоне (TIG), ток 120 А, напряжение 12 В, на подложку из среднеуглеродистой стали. Химический состав сварочных проволок приведен в таблице 1. Толщина наплавленного слоя составляла 4⁻¹ мм.

Таблица 1 – Химический состав наплавленных материалов, мас. %

Материал	состав
06X19H9T	≤0,08 C; 18-20 Cr; 8-10 Ni; 0,4-1,0 Si; 1,0-2,0 Mn; ≤0,03 P; ≤ 0,015 S; (5×C%) Ti, основа Fe
Урал AS-3	0,83 C; 25,0 Cr; 0,12 Ni; 0,5 Si; 0,4 Mn; 1,15 Al; 2,4 Ti, основа Fe
ППМ-6	0,6 C; 8,0 Cr; 1,5 Al; 1,0 Ti; основа Fe

Абразивное испытание: Эксперименты по испытанию на абразивный износ проводилась по методу Бринелля-Ховарта [3], установка представлена на рисунке 1. Абразивные частицы пропускают из емкости по специальной трубке, в результате абразив поступает между образцом и вращающимся обремененным колесом, так что оно вращается в

том же направлении, что и абразивный материал. В качестве абразивного материала применяли электрокорунд с размером частиц 125-180 мкм. На рычаг помещали определенную нагрузку, которая формирует сжимающую силу между обрезиненным диском и образцом. Размер образца для данного испытания составляет 70 x 18 x 8 мм. Общее время испытания на абразивный износ в этом исследовании составляло 10 минут, а измерения потери массы материала проводились каждую минуту с использованием аналитических демпферных весов АДВ-200 с погрешностью 1,0 мг. Параметры проводимых испытаний: нагрузка: 5 кг; скорость вращения диска: 75 об/мин; диаметр диска: 0,2 м; расход абразива: 110 г/мин; полное время испытания: 600 сек; плечо нагрузки: 0,3 м.



Рисунок 1 – Установка Бринелля-Ховарта для исследования износостойкости

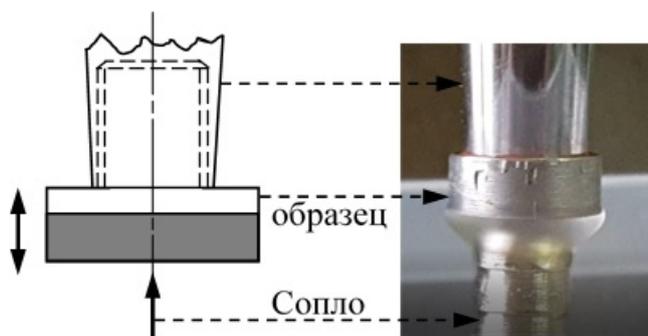


Рисунок 2 – Принципа работы установки на оценки кавитационной стойкости

Кавитационное испытание: Образцы для испытаний готовили в соответствии с требованиями стандарта ASTM G32–10. Условия испытаний кавитации, на разработанной авторами установке [3]: частота $20 \pm 0,1$ кГц, амплитуда 55 ± 3 мкм и мощность ультразвукового генератора 500 Вт. В качестве испытательного раствора использовалась вода, и было приложено определенное напряжение (12 В). ускорить кавитацию и дать комбинированный эффект. Описание принципа работы теста на кавитацию, принятого в этом исследовании, показано на рисунке 2. Общее время воздействия теста на кавитацию составило 330 минут. Весы лабораторные равноплечие ВЛР-200 с погрешностью 0,5 мг использовали для оценки потери массы испытуемого образца.

Результаты исследования

Результаты абразивного износа: Потеря массы и скорость износа как функция по времени испытания для наплавленных материалов и материала подложки представлены на рисунках 3 и 4 соответственно. Разницу в потере массы между наплавленными материалами и подложкой можно легко сравнить. Существует небольшая разница в потере массы между Урал АS-3 и 06X19H9T, так что Урал АS-3 лучше, чем 06X19H9T, примерно на 10%. Лучшим материалом среди всех изученных материалов был ППМ-6. Он показал более высокую стойкость к абразивному износу, чем у Урал АS-3 и 06X19H9T, примерно на 41% и 56% соответственно. Скорость абразивного износа как функция времени испытаний для всех испытанных материалов показана на рисунке 4. Существует небольшая разница между Урал-АС-3 и 06X19H9T в начале испытаний, в то время как по сравнению с ППМ-6 можно увидеть отчетливую разницу. Максимальная скорость абразивного износа была зарегистрирована для материала подложки, которая составляла 90 мг/мин, в то время как минимальная скорость абразивного износа составляла 31 мг/мин для материала ППМ-6 как показано на рисунке 5.

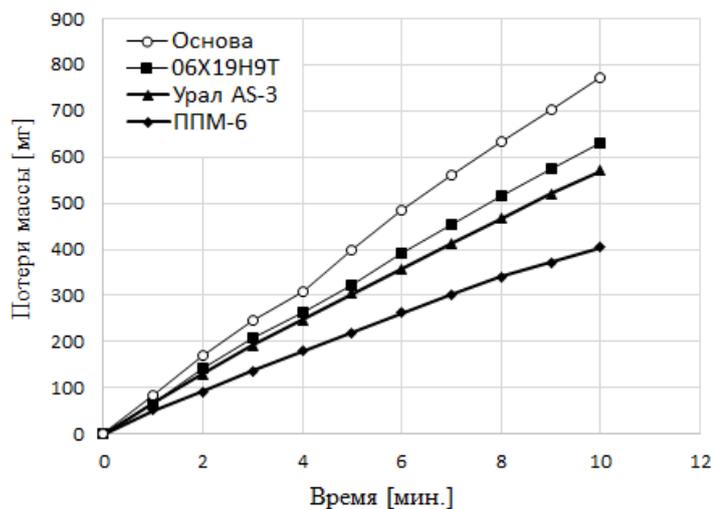


Рисунок 3 – Результаты испытаний абразивного износа материалов (потери массы)

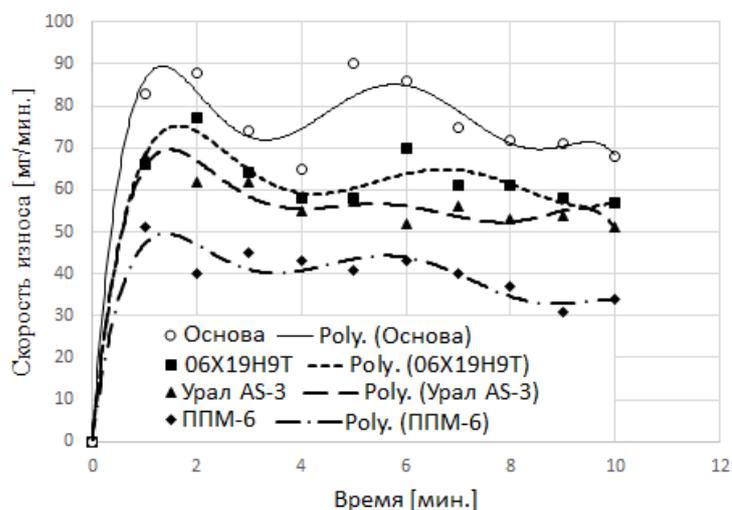


Рисунок 4 – Результаты испытаний на абразивную стойкость (скорость износа)

HV₁₀ измеряли для наплавленных материалов до и после абразивного испытания, как показано в таблице 3.

Таблица 3 – HV₁₀ наплавленных материалов

Исследуемые материалы	HV ₁₀ перед испытанием	HV ₁₀ после испытания
06X19H9T	242 ± 12	331 ± 26
Урал AS-3	256 ± 2	244 ± 8
ППМ-6	685 ± 57	764 ± 5

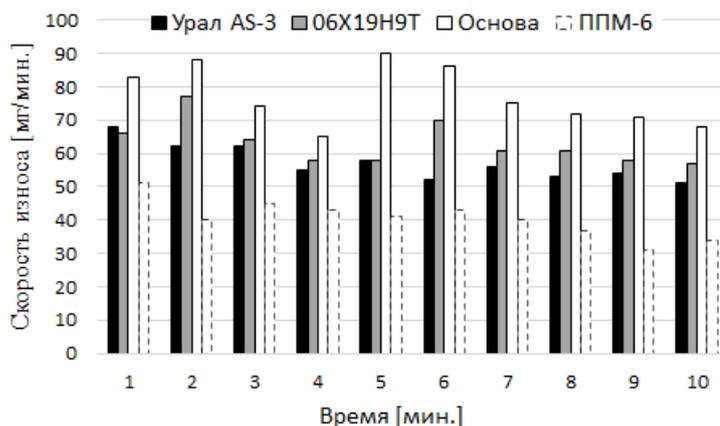


Рисунок 5 – Суммарный абразивный износ материалов (по потере массы)

Результаты кавитационных испытаний: Результаты кавитации показывают, что существует значительная разница в характеристиках каждого материала, но ППМ-6 и 06Х19Н9Т демонстрируют почти одинаковое поведение, рис. 6.

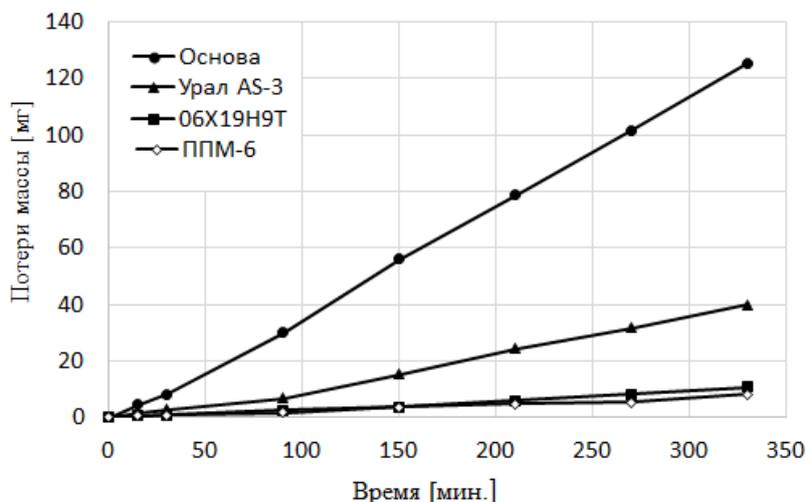


Рисунок 6 – Результаты испытаний на кавитационную стойкость

Выводы

- Все наплавочные материалы показали более высокую стойкость к абразивному износу и кавитации, чем материал подложки.
- Среди всех испытанных материалов ППМ-6 показал наилучшие результаты как для абразивного износа, так и для испытаний на кавитацию.
- 06 06Х19Н9Т продемонстрировал лучшую стойкость к кавитации, чем у Урал AS-3. В отличие от этого Урал AS-3 показал несколько лучшую стойкость, чем 06Х19Н9Т при абразивном износе.
- Для испытания на абразивный износ ППМ-6 был лучше, чем подложка, 06Х19Н9Т и Урал АС-3 на 90%, 56% и 41% соответственно. Для кавитации, ППМ-6 был лучше, чем 06Х19Н9Т, на 30%, в 5 раз лучше, чем Урал АС-3, и в 15 раз лучше, чем подложка.

Список литературы

1. Нефедьев С.П., Дёма Р.Р., Котенко Д.А. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 103-106.
2. Karimi A. and Martin J.L. Cavitation erosion of materials, Int. Met. Rev. – 1986. – Vol. 31. – P. 1-26.
3. Коробов Ю.С., Алван Х.Л., Лежнин Н.В., Соболева Н.Н., Макаров А.В. Девятьяров М.С., Давыдов А.Ю. Сопротивление эрозионно-коррозионному кавитационному воздействию WC-CoCr- и WC-NiCr- покрытий, полученных методом HVOF, Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 130-летию изобретения Н.Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом, СВАРКА И КОНТРОЛЬ, Пермь, 18–21 сентября 2018 года, С. 183-193.

BEHAVIOR OF A WELDED-DEPOSITED STAINLESS STEEL TESTED AT DIFFERENT CAVITATION TEST CONDITIONS

H.L. ALWAN^{1,2,A}, Yu.S. KOROBOV^{2,3,B}, N.N. SOBOLEVA^{2,4,C}, N.V. LEZHININ^{3,D}, A.V. MAKAROV^{2,3,4,E}, M.S. DEVIATIAROV^{5,F}, D.M. ELKIND²

¹University of Technology, Baghdad, Iraq; ²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation; ³M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ⁴Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ⁵Ural Welding Institute-Metallurgy, Yekaterinburg, Russian Federation

E-mail: ^alefta.hussam@gmail.com, ^byukorobov@gmail.com, ^cnatashasoboleva@list.ru
^dnlezhnin@bk.ru, ^eav-mak@yandex.ru, ^fdms@mashprom.ru

Keywords: Vibratory cavitation testing method, cavitation erosion-corrosion, depositing coatings.

Aim of the study: Applying two different ultrasonic vibratory-cavitation test conditions (water-voltage and 3.5% NaCl solution) to a welded-deposited austenitic stainless steel AISI 321 (known as 06X19H9T) to evaluate the resistance of deposited layer to cavitation erosion-corrosion.

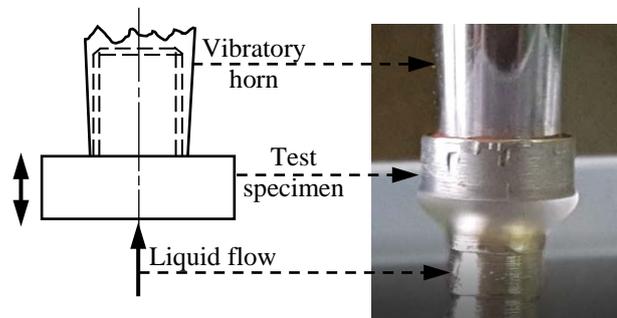
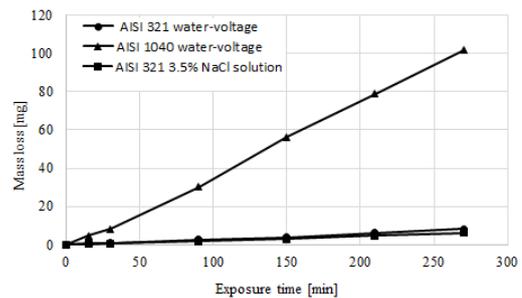
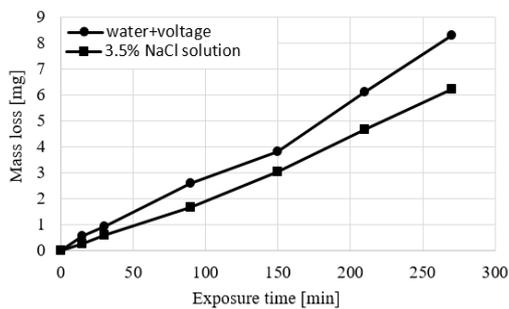


Figure 1 – Work principle of the cavitation test facility

Results: The results obtained include cavitation curves (material loss-time curves) for the deposited stainless steel and AISI 1040 steel substrate, surface roughness, and scanning electron microscope (SEM) micrographs.



Material loss – time curves of the deposited 06X19H9T stainless steel and AISI 1040 substrate

Ra values of the 06X19H9T before and after applying the two cavitation test conditions.

Before cavitation test 0.71 μm ; Water-Voltage condition 1.06 μm ;
 3.5% NaCl solution condition 0.91 μm

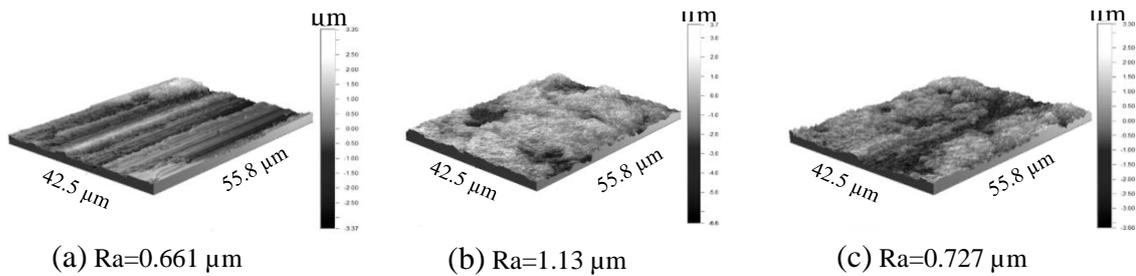


Figure 2 – Surface topography and Ra values of the 06X19H9T before and after testing: a – original surface before cavitation test, b – water-voltage condition, c – 3.5% NaCl solution condition.

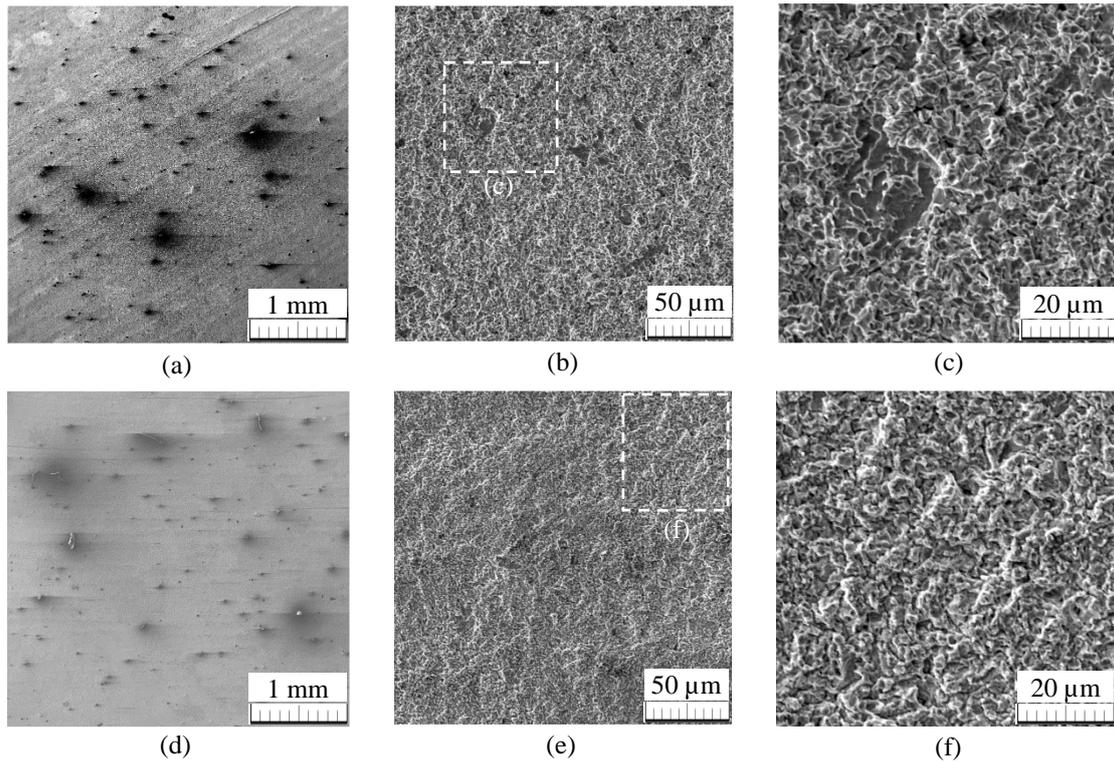


Figure 3 – SEM micrographs of the eroded surfaces of 06X19H9T for the two cavitation test conditions:

a, b, c – water-voltage condition; d, e, f – 3.5% NaCl solution condition.

Conclusion: The welding wire of the 06X19H9T stainless steel was deposited by using gas tungsten arc welding process onto the AISI 1040 substrate. The ultrasonic vibratory tests, surface topography and scanning electron microscope – SEM micrographs were used to evaluate the cavitation erosion-corrosion resistance of the deposited layer. The main results are as follows:

- The deposited layer was more damaged when applying the water-voltage condition comparing with applying the 3.5% NaCl solution condition. This is due to the significant effect of voltage which induces an electrochemical action.
- Ultrasonic vibratory cavitation tests showed that the mass loss for the water-voltage condition was higher comparing with using the 3.5% NaCl solution.
- The results of surface topography and scanning electron microscope micrographs are consistent with cavitation tests in terms of the eroded surfaces and the values of Ra.
- Cavitation erosion-corrosion resistance of deposited 06X19H9T stainless steel layer is 12 times as high comparing with the 1040 steel substrate.

COMPARISON OF THE RESISTANCE TO CAVITATION AND ABRASIVE WEAR OF DEPOSITED LAYERS PREPARED FROM STEELS 06X19H9T AND FE-CR-TI-AL

H.L. ALWAN^{1,3}, Yu.S. KOROB^{1,2}, N.O. BESSONOV¹, M.S. SMOLENTSEV¹, N.V. LEZHININ², N.M. RAZIKOV¹, M.N. RAZIKOV¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation; ²M.N. Miheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ³University of Technology, Baghdad, Iraq
E-mail: ^alefta.hussam@gmail.com, ^byukorobov@gmail.com

Keywords: Abrasive wear, ultrasonic vibratory cavitation test, surfacing.

Aim of the study: Evaluation the resistance of deposited layers produced by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW or TIG) process to cavitation erosion and abrasive wear for the steels AISI 321 (known as 06X19H9T manufactured according to the Russian standard GOST 18143-72) and Fe-Cr-Ti-Al (two materials namely Ural AS-3 and PPM-6). The tests used here are ultrasonic vibratory method and a three-body abrasion test for evaluation the resistance to cavitation erosion and abrasive wear, respectively.

Table 1 - The chemical compositions of the deposited welding wire materials [wt. %].

Material	C	Cr	Ni	Si	Mn	Al	P	S	Ti	Fe
06X19H9	Max.	18.0-	8.0-	0.40-	1.00-	-	Max.	Max.	Min.	Bal.
T	0.08	20.0	10.0	1.00	2.00	-	0.03	0.015	5×C	Bal.
Ural AS-3	0.83	25.0	0.12	0.5	0.4	1.15	-	-	2.4	Bal.
PPM-6 (ППМ-6)	0.6	8.0	-	-	-	1.5	-	-	1.0	Bal.

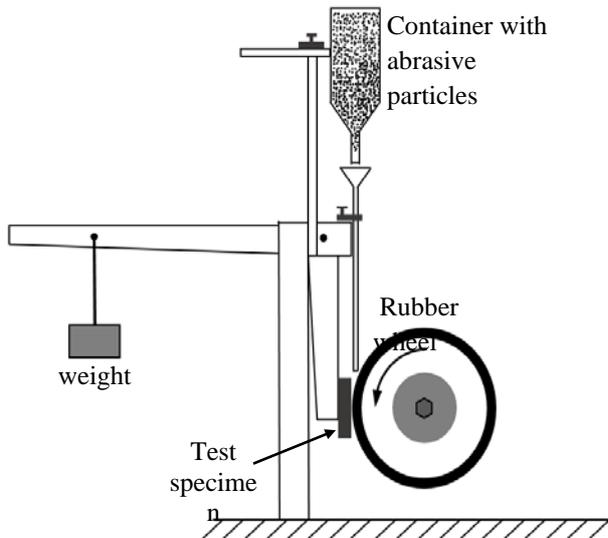


Figure 1 – Schematic diagram of Brinell-Hovart rubber wheel abrasion wear test.

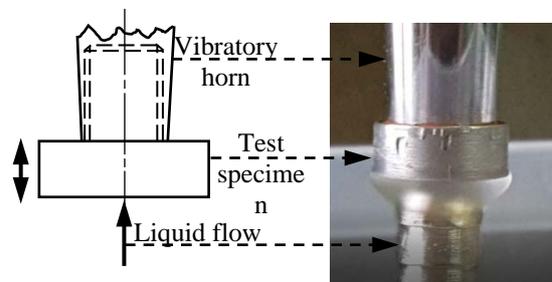
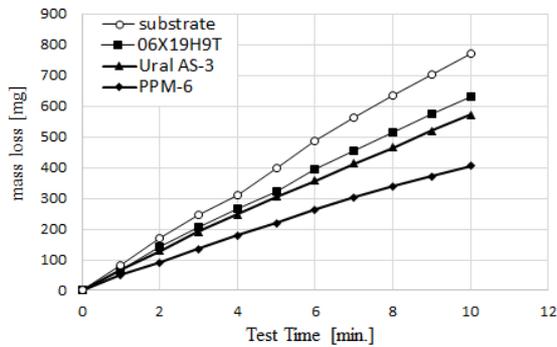


Figure 2 – The work principle of the cavitation test.

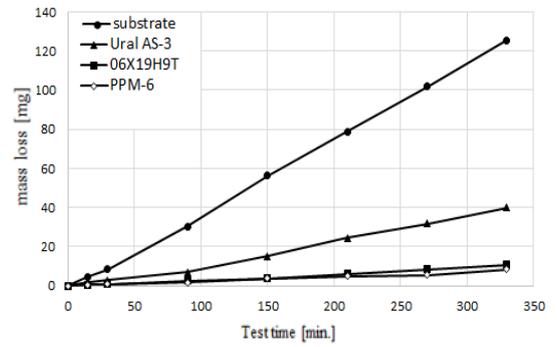
Results:

Table 2 – The HV₁₀ of the deposited materials before and after abrasive test.

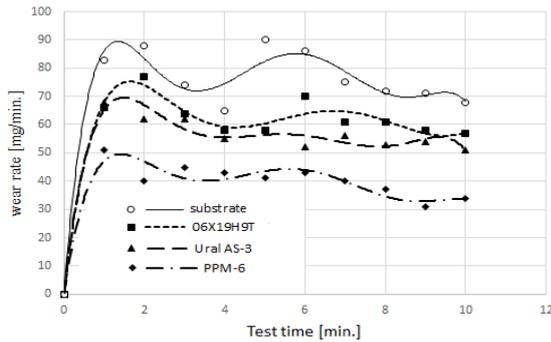
Tested material	HV ₁₀ before testing	HV ₁₀ after testing
Ural AS-3	256 ± 2	244 ± 8
06X19H9T	242 ± 12	331 ± 26
PPM-6	685 ± 57	764 ± 5



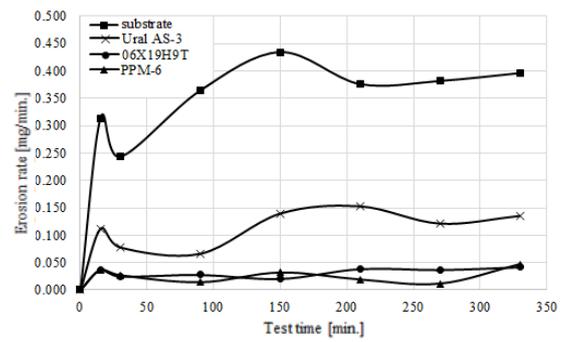
Results of three-body abrasion test of all studied materials (mass loss)



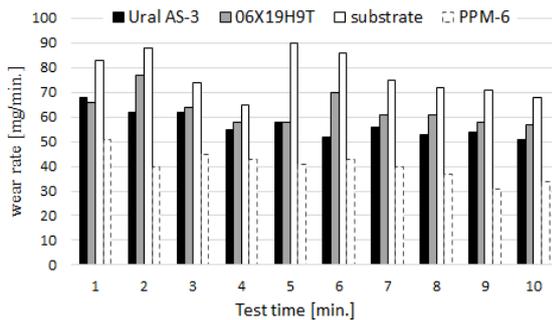
Cavitation results (mass loss) of all the studied materials



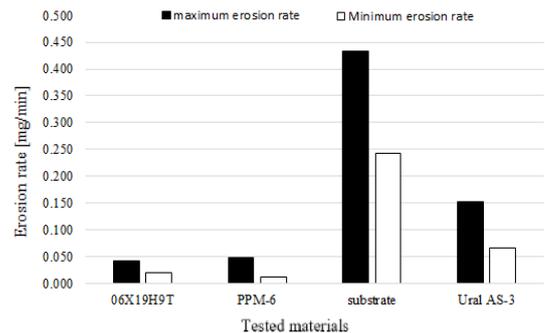
Results of three-body abrasion test of all studied materials (wear rate)



Behavior of the studied materials during the cavitation test (erosion rate)



Wear rates during the three-body abrasion test for the tested materials



Maximum and minimum erosion rates of the studied materials during the cavitation test

Conclusions: A three-body abrasion and an ultrasonic vibratory tests were performed to evaluate the resistance to abrasive wear and cavitation erosion-corrosion of deposited layers prepared from steels 06X19H9T and Fe-Cr-Ti-Al. The results showed the following:

- All the deposited materials exhibited a higher resistance to abrasive wear and cavitation than the substrate material AISI 1040 steel.
- Among all the tested materials, the PPM-6 showed the better resistance to the abrasive wear and cavitation erosion-corrosion.
- The cavitation results showed that both PPM-6 and 06X19H9T are almost identical.
- The 06X19H9T was exhibited a better resistance to cavitation comparing with the Ural AS-3. In contrast Ural AS-3 showed to some degree a better resistance than the 06X19H9T regarding the abrasive wear.
- For abrasive wear test, the PPM-6 has a better resistance than the substrate AISI 1040 steel, 06X19H9T, and Ural AS-3 by 90%, 56% and 41%, respectively. As for cavitation erosion-corrosion, the PPM-6 was exhibited a better resistance than the 06X19H9T by 30%, 5 times higher than Ural AS-3, and 15 times as high comparing with the AISI 1040 substrate steel.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Г. АЛРУХАЙМИ, М.А. ИВАНОВ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

E-mail: anmarengineer10@gmail.com

Известно, что на склонность образования холодных трещин влияют характеристики прочности сварочных материалов. Для проверки данной гипотезы был проведен натурный эксперимент на высокопрочной стали 10Г2ФБЮ класса прочности К60 (РС Е500W) толщиной 25,8 мм (предел текучести стали 550 МПа). Испытания проводились на пробе Тэккен [1, 2]. В качестве сварочных материалов были использованы порошковые проволоки диаметром 1,2 мм марок KOBELCO DW-A70L; KOBELCO DW-A65L; ESAB FILARC PZ6115; ESAB FILARC PZ6125. Сварка выполняли в среде защитных газов К-18 на сварочном роботе FANUC ARC Mate 120iC на погонной энергии $7 \pm 0,5$ кДж/см. Образцы выдерживались 48 часов, после чего проводился визуальный контроль, который показал, что в образцах заваренной проволокой KOBELCO DW-A70L с пределом текучести 668 МПа, имеется поверхностная трещина протяженностью 8 мм. В остальных сварных швах проб поверхностных трещин не обнаружено. Для выявления трещин, не вышедших на поверхность сварного шва все пробы Тэккен были разрезаны на контрольные образцы, поперечные сечения которых подлежат исследованию с помощью оптического прибора с увеличением не менее $\times 50$.

При анализе макрошлифов, пробы, выполненные проволокой KOBELCO DW-A65L (предел текучести 654 МПа) дали неудовлетворительный результат, т.к. в них были обнаружены трещины длиной более 0,5 мм.

При сварке мягкой и равнопрочной по отношению к основному металлу проволоками ESAB FILARC PZ6115 и FILARC PZ6125 с пределом текучести 445 – 557 МПа – поверхностных трещин не было, а трещины в корне шва не превышали допустимого значения в 0,5 мм, что подтверждает ранее высказанное предположение о целесообразности выполнения корневых проходов сварных соединений высокопрочных марок сталей мягкими сварными швами.

Таким образом, пробы, давшие неудовлетворительный результат, были заварены твердыми сварочными проволоками с пределом текучести 654–668 МПа. Причем в пробе Теккен, заваренной проволокой KOBELCO DW-A70L, корневая трещина распространилась практически на всю длину испытуемого сварного шва. В то же время мягкая и равнопрочная проволока не привела к образованию холодных трещин.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012 Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 2. Испытания с естественной жесткостью.
2. BS EN ISO 17642-2:2005 «Destructive tests on welds in metallic materials — Cold cracking tests for weldments — Arc welding processes — Part 2: Self-restraint tests».

USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY FOR MODELING AND OPTIMIZING THE MAXIMUM TENSILE STRENGTH IN FRICTION STIR WELDING- COMPREHENSIVE STUDY

*R. AL-SABUR*¹, *M.S. SLOBODYAN*²

¹ Mechanical Engineering Department, Basrah University, Basrah, Iraq.

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk

E-mail: raheemalsabur@gmail.com, s.m.s@ngs.ru

Abstract: Friction Stir Welding (FSW) is an emerging solid state joining technique leads to affected advantages over fusion welding methods where a non-consumable tool uses to join two surfaces depending upon the generate frictional heat between them especially in aluminum alloy. The FSW process parameters such as tool rotational speed, transverse speed, axial force and welding tool geometry play a major role in deciding the joint strength. In last decay, several attempts have been made to develop empirical relationships to predict the maximum tensile strength of the joint. Several methods are used to get the optimum FSW process parameters which are achieving the maximum tensile strength such as Response Surface Methodology (RSM), Taguchi Analysis, Artificial Neural Networks (ANN), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS), analysis of variance (ANOVA)... etc. Herein, a comprehensive literature review of using Response Surface Methodology (RSM) for modeling and optimizing the maximum tensile strength in friction stir welding has been introduced. This study also examines the presented empirical equations and compare the optimum condition results for the similar alloys.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

С.В. АНАХОВ¹, А.В. МАТУШКИН², Ю.А. ПЫКИН³

¹Российский государственный профессионально-педагогический университет,

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

³Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург

E-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru

В современных плазмотронах для резки металлов, как правило, применяется газовихревой способ стабилизации с тангенциальной подачей плазмообразующего газа (ПОГ) в сопловой узел и дополнительным обжатием плазменной дуги (струи) на выходе из сопла вихревым потоком стабилизирующего газа (в технологии узкоструйной плазмы) [1]. Тангенциально закрученный поток газа формируется в вихревых камерах (завихрителях), количество, конструкция и расположение которых в плазмотроне существенным образом определяет эффективность резки металлов. Проведенные ранее авторами исследования [2] показали, что известный способ газовихревой стабилизации с применением однопоточной схемы подачи ПОГ в сопловой узел через единственный завихритель из-за асимметрии подачи газа в расширительную камеру не обеспечивает равномерность распределения газового потока по сечению газоздушного тракта (ГВТ) и в сопловом канале плазмотрона. Для повышения коэффициента равномерности распределения газового потока можно увеличить размеры камеры или использовать систему газодинамических фильтров в виде дополнительных препятствий в расширительной камере. Однако, при этом возрастает трудоемкость изготовления и стоимость плазмотрона. В этой связи следует исследовать и другие возможности конструктивного улучшения системы газовихревой стабилизации металлорежущих плазмотронов.

В качестве моделей для исследования были взяты два разработанных в авторском коллективе плазмотрона для резки металлов производства ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург):

- ПМВР-5.3 – из серии однопоточных плазмотронов ПМВР-5 со встроенным ступенчатым газодинамическим фильтром повышенной производительности для работы на токах до 200 А);

- ПМВР-9.1 – из серии двухпоточных плазмотронов ПМВР-9 со встроенным газодинамическим фильтром и системой двойного обжатия плазменной дуги (технология «узкоструйной плазмы»).

Конструкция ГВТ плазмотрона ПМВР-5.3 построена по принципу ступенчатого выравнивания скорости потока ПОГ по сечению канала (т.е. газ поступает из одного канала в 2, потом из 2-х в 4 и т.д.). Заключительным звеном в данной цепочке является основной завихритель. Изначально при испытаниях плазмотрона был применен серийный завихритель, устанавливаемый на катод А-141. Поток ПОГ на выходе из данного завихрителя имеет только радиальную составляющую скорости потока. На втором этапе испытаний конструкции плазмотрона вместо серийного завихрителя был использован модернизированный завихритель с измененным количеством отверстий и добавлением наклона отверстий по отношению к оси плазмотрона. Поток ПОГ на выходе из такого завихрителя обладает не только радиальной, но и осевой составляющей скорости потока. Конструкция плазмотрона ПМВР-9.1 построена на разделении потока ПОГ на два – плазмообразующий и стабилизирующий - с отдельной подачей газа в сопловой узел.

Для оценки влияния различных способов газовихревой стабилизации на эффективность работы плазмотронов были проведены расчеты кинематических свойств (локальной скорости) плазменной струи. Исследования были основаны на моделировании течения потока газа по каналам плазмотрона и в области его истечения, выполненном в среде SolidWorks в приложении Flow simulation.

Анализ полученных распределений скоростей позволяет сделать вывод о влиянии примененного в плазмотроне ПМВР-5.3 нового завихрителя на кинематические свойства

струи. Имеющаяся на срезе сопла неравномерность распределения скоростей по сечению канала по мере удаления от плоскости истечения струи становится существенно менее выраженной. При этом на максимальном расчетном удалении в струе плазмотрона ПМВР-5.3 с новым завихрителем наблюдается меньший разброс скоростей при сопоставимых максимальных и более высоком значении средних по сечению показателей по сравнению со струей, формируемой плазмотроном ПМВР-5.3 с серийным завихрителем. Фактически это свидетельствует о сохранении более высоких энергетических свойств на более значительном диапазоне длины плазменной струи, что, в свою очередь, должно положительно повлиять на вольт-амперные характеристики дуги и её способность к резке металла большей толщины с повышенной скоростью. Применение дополнительного обжатия основного плазмообразующего потока в плазмотроне ПМВР-9.1 позволяет существенно снизить характерные для плазмотрона ПМВР-5.3 неоднородности распределения скоростей, возникающие на срезе сопла из-за срыва резко расширяющегося потока. Кроме того, струя плазмотрона ПМВР-9.1 обладает более высокими кинетическими свойствами (имеет более высокие максимальные скорости), чем струя плазмотрона ПМВР-5.3. Однако, подобные преимущества наблюдаются лишь в пределах удаления на 15-20 мм от среза катода. На больших расстояниях наиболее высокие показатели равномерности распределения и кинетических свойств имеет плазмотрон ПМВР-5.3 с новым завихрителем. Рост данных показателей, в свою очередь, должен сказаться на увеличении производительности и качества резки.

Последний вывод подтверждается данными, полученными в процессе резки плазмотроном ПМВР-5.3. При резке пластины из стали 09Г2С толщиной 10 мм на токе в 90 А максимальная скорость резки была не более 1.1-1.2 м/мин. В результате применения модернизированного завихрителя максимальная скорость резки увеличилась до 1.5-1.6 м/мин. Это дает основание провести дальнейшие исследования по определению оптимального угла ввода ПОГ и его влиянию на производительность, качество резки и надежность работы плазмотрона.

Список литературы

1. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования плазмотронов. – Екатеринбург: РГППУ, 2018 – 165 с.
2. Anakhov S.V., Pykin Yu.A., Matushkin A.V. Investigation of systems for gas vortex stabilization of plasma torches // Welding International. – 2016. – Vol. 30. – № 4. – P. 310-314.

Тезисы опубликованы по результатам работ, выполненных по госзаданию Министерства образования и науки № 13.10317.2018/11.12.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧИСТОВОЙ РЕЗКИ НОВЫМИ ПЛАЗМАТРОНАМИ

С.В. АНАХОВ¹, Н.Б. ПУГАЧЕВА², Б.Н. ГУЗАНОВ¹, Т.М. БЫКОВА²

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург

² Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

E-mail: tatiana_8801@mail.ru

В работе исследовано влияние угла наклона плазматрона ПМВР-5.3, работающего по узкоструйной технологии, на рельеф поверхности реза, структуру и твердость материала швов пластин стали 09Г2С толщиной 10 мм. Плазматрон ПМВР-5.2 представляет собой модификацию отечественного узкоструйного плазматрона ПМВР-5 производства НПО “Полигон” и ООО “Терус”. Плазменную резку проводили при разных углах наклона плазматрона 30° и 90°.

Рельеф поверхности образцов после плазменной резки исследовали с помощью оптического интерферометра Veeco по центру реза. Металлографические структурные исследования образцов выполняли на микроскопе Neophot 21 при увеличении $\times 100$. Твердость образцов измерялась на приборе Leica при нагрузках на индентор 0,245 и 9,8 Н. Применение нового узкоструйного плазматрона ПМВР-5.3 позволяет получать на пластинах стали 09Г2С разделочные швы со средней (7 – 9 мкм) и максимальной (48 мкм) шероховатостью поверхности, соответствующим 1 классу качества по ГОСТ 14792-80 (рисунок 1).

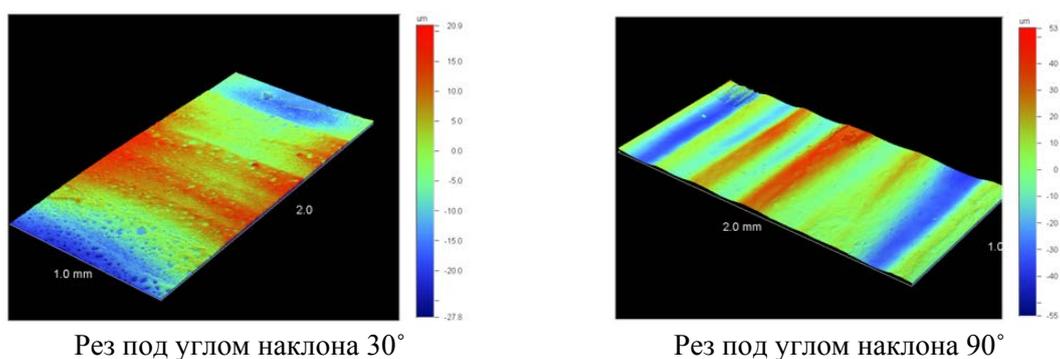


Рисунок 1 – Рельеф поверхности реза образцов

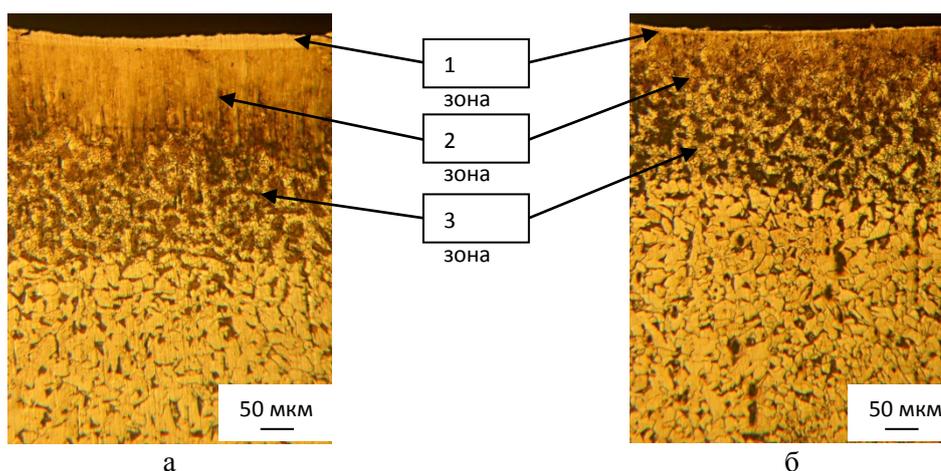


Рисунок 2 – Структура поверхности образцов в зоне реза: а – рез под углом наклона плазматрона 30°, б – рез под углом наклона плазматрона 90°

При плазменной резке в зоне воздействия струи плазмы происходит расплавление металла, за счет чего пластина разделяется на два фрагмента. Вблизи образовавшихся поверхностей реза сталь разогревается до разных температур в зависимости от удаления вглубь пластины. Материал разделочного шва представляет собой зону термического

влияния (ЗТВ), структурно состоящую из 3-х зон с плавно увеличивающейся долей перлита до 100 % его содержания вблизи поверхности реза. Высокие скорости охлаждения при резке под углом 30 ° привели к образованию бесструктурного мартенсита на поверхности, толщина этой зоны не превышает 30 мкм (рисунок 2 а).

Список литературы

1. Krink V., Simler H., Laurisch F. Plasmaschneidtechnologie— Erweiterung wirtschaftliche Anwendungsgebiete. // Proc. Int. Schneidtechnische Tagung (International Conference on Cutting Technology — ICCT 2006). – Hannover. Ed. F.-W.Bach. Inst. Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, 2006. – S. 18-25.
2. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов / Под ред. А.А. Кайдалов – К.: Экотехнология, 2007. – 456 с.
3. Анахов С.В., Матушкин А.В., Пыкин Ю.А. Новый плазмотрон для резки металла под сварку: сравнительный анализ // Вестник ЮУрГУ, сер. Metallургия. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 65-69.
4. Анахов С.В., Пугачева Н.Б., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В., Быкова Т. М. Микроструктурный анализ сварных соединений, полученных с применением плазменных технологий резки // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 2. – С. 16-22.
5. Анахов С.В., Пугачева Н.Б., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В., Быкова Т.М. Исследование качества резки стали с применением узкоструйной плазменной технологии // Физика и химия обработки материалов. – 2016. – № 4. – С. 31-37.

ОПЫТ СВАРКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ И УСТРОЙСТВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

С.А. АНДРЕЕВ, Е.М. ТАБАКИН, А.В. КАПЛИН

АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград
E-mail: kaplinav@yandex.ru

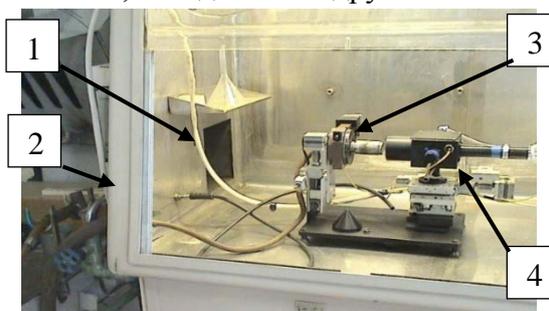
Основными направлениями деятельности АО «ГНЦ НИИАР» является производство радиоизотопной продукции и проведение реакторных исследований и экспериментов. С этой целью на предприятии разрабатываются и изготавливаются источники ионизирующего излучения и различные экспериментальные устройства. Конструкции большинства изделий представляют собой малогабаритный тонкостенный корпус цилиндрической формы, герметизируемый сваркой с размещённым внутри радиоактивным материалом. Успешность эксплуатации таких изделий во многом зависит от качества сварных соединений. В связи с этим, к ним предъявляются высокие требования по сплошности и герметичности.

Наиболее характерным дефектом при сварке малогабаритных изделий является выплеск расплавленного металла в результате выхода расширяющегося газа из изделия в процессе сварки. Кроме того, при сварке изделий, содержащих радиоактивные материалы, работы выполняются в дистанционных условиях защитных камер с манипуляторным обслуживанием. Проведенные исследования, конструкторские и технологические разработки позволили создать в АО «ГНЦ НИИАР» технологические процессы и специализированное оборудование для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом для изделий диаметром от 5 до 110 мм и длиной до 3000 мм в условиях γ и нейтронного излучения (рис. 1).

Сварку изделий с α и β излучением выполняют в условиях защитных боксов. Помимо установок аргонодуговой сварки неплавящимся электродом для таких условий реализована технология дистанционной импульсной лазерной сварки (рис. 2). В этом случае, силовая часть установки находится за пределами бокса. Луч вводится в защитный бокс к месту сварки по специальному световоду. Механизм вращения изделия, система позиционирования луча и видеоконтроля позволяют выполнять герметичные сварные швы изделий, толщиной от 0,003 до 0,2 мм. Данное оборудование было использовано при выполнении работ по сварке изделий, содержащих радиоактивные материалы, из дисперсно-упрочненных, ферритно-мартенситных сталей, алюминиевых, титановых, ванадиевых и других сплавов.



а



б

Рисунок 1 – Внешний вид типовых изделий

Рисунок 2 – Установка дистанционной лазерной сварки. 1 – световод; 2 – защитный бокс; 3 – вращатель с системой позиционирования; 4 – излучатель с видеокамерой

Часто к экспериментальным изделиям предъявляются требования по наличию особой атмосферы во внутренней полости. Например, для повышения эффективности и безопасности облучения экспериментальных изделий и устройств, необходимо обеспечивать высокую концентрацию инертного газа-гелия в их внутреннем объеме, в том числе и при давлении превышающем атмосферное. Для обеспечения этих условий была разработана и

внедрена установка сварки, позволяющая герметизировать изделия в контролируемой атмосфере под избыточным давлением до 16 МПа. В ряде случаев герметизацию изделий требуется осуществлять в условиях вакуума. Для этих целей был создан участок лазерной сварки с применением вакуумной камеры, обеспечивающая разряжение $P=1 \times 10^{-2}$ мм рт. ст.

В случае сварки изделий, содержащих радиоактивные материалы, контроль их герметичности так же выполняется в условиях радиационно-защитных камер и боксов. При таком контроле, кроме общепромышленных гелиевых течеискателей, необходимо использовать вспомогательные оснастку и устройства, позволяющие выполнять процесс в дистанционных условиях.

Представленные разработки успешно реализованы при сварке и контроле ответственных изделий атомной техники.

О МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ АБРАЗИВНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

АН И-КАН¹, Э.Л. ВОЛЬФ¹, Ю.Н. САРАЕВ², А.С. ШВЕЦ¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.

E-mail: igwan@sibmail.com

1. Проблема. Условия работы техники «северного исполнения» (особенно землеройных машин и горнотранспортного оборудования) характеризуется значительной крепостью разрабатываемых пород и их большой абразивностью, которые находятся в прямой зависимости от температуры окружающей среды. С наступлением холодного периода производительность карьерного оборудования снижается в среднем в 1,5 раза; наработка на отказ - в 2,4 раза; вероятность безотказной работы - в 2,1 раза при нарастании потока отказов в 3,3 раза и т.д. Помимо отмеченных показателей надежности (суммарно их 34), в основном связанных с потерей работоспособности несущих элементов механических систем, необходимо также подчеркнуть следующее: расход запасных частей и материалов на эксплуатационные нужды возрастает до 8 раз!

Резкое снижение работоспособности машин и оборудования в суровых климатических условиях чаще всего связано с интенсивным износом деталей ходовой части, особенно это относится к режущим элементам ковшей экскаваторов. Известно, что режущие элементы в зимний период изнашиваются в сотни раз больше, чем в летний.

2. Причина высокой изнашиваемости. Как следует из изложенного выше одной из основных причин повышенного износа элементов механических систем является увеличение прочности мерзлого грунта при низкотемпературном воздействии (глубина залегания слоя вечномерзлых грунтов может достигать несколько километров). Высокая механическая прочность и повышенная абразивность мерзлых грунтов в условиях охлажденной воздушной среды являются основными факторами, вызывающими повышенную механическую изнашиваемость материалов, из которых изготовлены детали машин и элементы оборудования.

Вторым не менее значимым, с точки зрения воздействия на абразивную износостойкость материалов, является фактор, связанный с неблагоприятным влиянием низких температур на их физико-механические свойства. Имеется много работ, результаты которых констатируют увеличение износных эффектов при низкотемпературном воздействии на металлические материалы. Вместе с этим встречаются и обратные утверждения. Причина вероятнее всего кроется в несоблюдении постоянства абразивных свойств изнашивающей среды, что не позволяет получать результаты, которые бы достоверно описывали закономерности абразивного низкотемпературного изнашивания металлов и сплавов. Это в свою очередь является важным для проектирования высоко – износостойких материалов.

3. О методологии и методике. Системный подход при анализе способов абразивного низкотемпературного изнашивания металлов и сплавов позволил все существующие схемы износных испытаний сгруппировать следующим образом: изнашивание абразивной струей; изнашивание в абразивной массе; изнашивание о закрепленный абразив; ударно-абразивное изнашивание (в 1963 году Сорокиным Г.М. выделено в отдельный вид).

Различие в объеме (либо по массе) разрушений, возникающих на изнашиваемых поверхностях обусловлено – в рассматриваемых способах износных испытаний – рядом факторов. Во-первых, на уровень сопротивляемости испытываемого материала механическому поверхностному разрушению оказывает влияние изменение его физико-механических свойств, которое происходит под воздействием низких температур (к низкотемпературным процессам принято относить те, которые протекают при температурах ниже 273К). Во-вторых, - характером приложения нагрузки и степенью закрепленности абразивных частиц, что на прямую связано с абразивной способностью самой изнашивающей среды.

Поэтому при исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания (механо-физический аспект) необходимо с методических позиций обеспечить такие условия испытаний:

- а) процесс поверхностного разрушения должен реализоваться при свободном развитии пластических деформаций;
- б) абразивная способность изнашивающей среды, не должна меняться при фрикционном взаимодействии с охлажденной поверхностью образца;
- в) параметры режима испытаний на абразивный износ (помимо температуры) не должны оказывать преобладающего влияния на механизм возникновения частицы износа. В противном случае нивелируется влияние низкотемпературного фактора на проявление эффекта хладноломкости при низкотемпературном механическом изнашивании металлов и сплавов.

Вывод: наиболее приемлемым для достижения цели настоящего исследования, которое состоит в изучении закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания, явилось использование способа кольца, вращающегося в потоке абразивных частиц (обстоятельно этот способ был изучен в работах Кашеева В.Н.).

4. Результаты. Изучение сопротивляемости абразивному низкотемпературному изнашиванию наплавов промышленного назначения (ЭН – 60М, ОМГ – Н, ОЗИ – 1, Т – 590) выявило факт повышенной абразивной износостойкости во всем интервале исследованных температур у наплавов, содержащих в своем составе высокое содержание углерода, а значит и карбидной фазы. Независимость величины износа от уровня задаваемого охлаждения обнаружена у наплавки Т – 590. В этой связи можно предположить, что получаемый в процессе наплавки износостойкий слой приобрел максимально возможное упрочнение. Это приводит к малой деформационной способности (в плане ресурса по пластичности) наплавленного металла и как показывает исследования ударной вязкости от уровня низкой температуры.

На основании проведенного исследования, в программе которого изучались и экспериментальные наплавки, показано, что для широкого практического применения разработку износостойких наплавов следует вести с использованием системы легирования Fe-C-Cr-Si. Проведенный расчет экономической эффективности и технической целесообразности доказал, что рассматриваемый вариант является экономичным вариантом легирования.

Список литературы

1. Данные Карагандинских исследователей (Данияров А.Н., Кучин В.Н., Малыбаев С.К., Хайрулин Т.Х.)
2. Ан И-Кан, Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н. «Физико-механические аспекты абразивного изнашивания в условиях охлажденной воздушной среды» // Обработка металлов. – 2019 – Т. 21. – № 1. – С. 108-121.
3. Гринберг Н.А. «Наплавочные материалы для работы в условиях абразивного изнашивания и ударных нагрузок при отрицательных температурах» // Сб.: «Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы». Киев, изд. ИЭС им. Е.О. Патона, 1978, – С. 34-41.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ АТОМОВ АЗОТА И УГЛЕРОДА

Е.Г. АСТАФУРОВА, С.В. АСТАФУРОВ, Г.Г. МАЙЕР, И.А. ТУМБУСОВА

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: elena.g.astafurova@gmail.com

С использованием методов просвечивающей и растровой электронной микроскопии изучены механизмы пластической деформации и разрушения ванадийсодержащих сталей с высоким содержанием азота и углерода $C+N>1$ мас.% – Fe-19Cr-22Mn-1,6V-0,4C-0,8N ($C+N=1,2$ мас.%) и Fe-22Cr-26Mn-1,3V-0,7C-1,2N ($C+N=1,9$ мас.%) в интервале климатических температур, характерных для Сибирского региона. После горячей прокатки стальные заготовки выдерживали в течение часа в среде инертного газа при температурах 1100-1230°C с последующей закалкой в воду. Испытания на одноосное растяжение образцов осуществляли с начальной скоростью деформации $5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ в интервале температур от -60°C до 60°C.

Независимо от температуры выдержки под закалку, для обеих исследуемых сталей характерен комплексный механизм упрочнения: зернограничное упрочнение, твердорастворное упрочнение аустенита атомами внедрения (азотом и углеродом) и дисперсионное твердение частицами карбонитридов на основе ванадия и хрома. Увеличение температуры закалки приводит к сильным эффектам твердорастворного упрочнения, вызывает рост зерна аустенита и уменьшает вклад от дисперсионного твердения. Независимо от состава стали, после закалки от температур 1100-1200°C образцы характеризуются вязким транскристаллитным разрушением при деформации в условиях комнатной и повышенных температур. Понижение температуры деформации сопровождается появлением транскристаллитных сколов на поверхностях разрушения стальных образцов при сохранении основного механизма – транскристаллитного вязкого излома. Повышение температуры выдержки под закалку до 1230°C приводит к формированию зернограничных частиц, которые вызывают интеркристаллитное разрушение стальных образцов независимо от температуры деформирования.

Экспериментально установлена температурная зависимость прочностных свойств, механизмов деформации и пластичности аустенитных хромомарганцевых ванадийсодержащих сталей при одноосном растяжении. Исследуемые стали с высоким содержанием атомов внедрения в твердом растворе аустенита и дисперсными частицами на основе хрома и ванадия проявляют сильную температурную зависимость предела текучести, свойственную сплавам внедрения с ГЦК кристаллической решеткой. Основными механизмами пластической деформации обеих сталей выступают дислокационное скольжение и механическое двойникование. Вклад от двойникования усиливается при понижении температуры деформации и с увеличением уровня твердорастворного упрочнения в сталях (увеличением температуры закалки). Твердорастворное упрочнение аустенита атомами внедрения усиливает планарность дислокационной структуры. Несмотря на изменение прочностных свойств и механизмов деформации обе стали не проявляют склонности к хрупкому разрушению по механизму квазискола в выбранном интервале температур деформации от -60 до 60°C.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Томской области (проект № 18-48-700042).

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Н.Ю. АФАНАСЬЕВ

ФГУП "НПО" ТЕХНОМАШ", г. Москва
E-mail: info@tmnpo.ru

В настоящее время в отрасли освоены и широко используются при изготовлении изделий ракетно-космической техники (РКТ) из алюминиевых сплавов различные способы сварки плавлением, включая сварку таким высококонцентрированным источником нагрева как электронный луч.

При этом сварке плавлением присущ ряд недостатков, включая остаточные напряжения, термическое разупрочнение металла, снижающее конструктивную прочность и образование дефектов в виде трещин при сварке ряда высокопрочных термоупрочняемых алюминиевых сплавов.

Поэтому одним из перспективных направлений технологии изготовления новых видов изделий РКТ является изыскание и разработка прогрессивных способов сварки, способных устранить или уменьшить негативные особенности существующих технологий. К таким перспективным направлениям следует отнести сварку трением с перемешиванием (СТП).

Основным достоинством СТП является возможность получения соединений без расплавления металла, что позволяет соединять трудносвариваемые материалы, уменьшить разупрочнение металла в околошовной зоне и, тем самым, повысить конструктивную прочность, а так же снизить остаточные напряжения и деформации, избежать образования дефектов в виде горячих трещин и пор.

В России первые опыты по изучению процесса СТП начали проводить в начале 2000-х годов ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева» совместно с ФГУП «НПО «Техномаш», ОАО «НИАТ», ОАО «Композит». Опытно-экспериментальные работы производились на лабораторных установках, выполненных на базе фрезерных станков, что ограничило возможность сварки толщин более 3-4 мм из-за невозможности создания необходимого сварочного давления на инструмент.

В отрасли планируется применение СТП при изготовлении баков изделия «Ангара», оболочковых конструкций и баков новых изделий ОАО «РКК «Энергия», «ГКНПЦ «ЦСКБ-Прогресс» из новых высокопрочных сплавов типа 1570, 1545, толщиной до 35 мм.

При этом номенклатура сварных соединений, выполняемых СТП, должна включать продольные и кольцевые швы обечаек, меридианальные швы днищ, круговые швы врезных элементов, изготавливаемых из новых высокопрочных алюминиевых сплавов.

При этом для широкого внедрения процесса СТП при изготовлении изделий РКТ необходимо продолжение работ по дальнейшему изучению особенностей получения соединений методом СТП и разработка отечественных промышленных образцов оборудования.

ИМПУЛЬСНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА СПЛАВА ZR-1%NB

К.А. БАЛАШОВА, С.И. СКРИПКО, М.С. СЛОБОДЯН

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: ksyu.alekseevna@gmail.com

Для соединения металлов малой толщины используются различные способы сварки плавлением. В настоящее время наметилась тенденция использования импульсной дуговой сварки, которая характеризуется простотой в использовании и относительно дешевым оборудованием. Однако в технической литературе не приведены рекомендации по выбору параметров импульса сварочного тока для сплава Zr-1%Nb, вследствие чего появилась необходимость проведения экспериментальных исследований.

Целью настоящей работы является исследование влияния энергетических параметров импульса сварочного тока дуговой сварки на геометрические размеры сварного шва при формировании модельных стыковых соединений листовых деталей из сплава Э110 (Zr-1%Nb) толщиной 0,5 мм.

В процессе исследования были проведены теоретические расчеты по методикам, изложенным в относительно недавно опубликованных обзорах по данной теме и многофакторный эксперимент. Получены данные о влиянии амплитуды, длительности и энергии импульса сварочного тока, а также расхода защитного газа на геометрические размеры сварных швов, химический состав, структуру и микротвердость металла.

Дальнейшие исследования по совершенствованию технологии импульсной дуговой сварки циркониевых сплавов следует проводить в направлении определения оптимальных значений энергетических параметров и расхода защитного газа. Необходимы дополнительные сведения о наиболее рациональных энергетических параметрах для других комбинаций иных циркониевых сплавов, конфигураций сварных соединений и толщин деталей, а также компьютерное моделирование процесса.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ПЛАЗМЕННО-Порошковой НАПЛАВКЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

И.А. БАРТЕНЕВ

Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан
E-mail: igor_svar@mail.ru

Прочностные свойства наплавленного металла, прежде всего, зависят от первичной структуры, образующейся в результате кристаллизации сварочной ванны. Главной особенностью плазменно-порошковой наплавки является введение в сварочную ванну присадочного металла в виде мелкозернистого порошка с диаметром частиц 0,1...0,4 мм. Мелкие фракции, пролетая через плазменную дугу, расплавляются, а крупные успевают только нагреться до температур в несколько сот градусов. В результате крупные частицы попадают в сварочную ванну в твердом состоянии. В головной части ванны они плавятся под действием тепла плазменной дуги, а в хвостовой части - ускоряют охлаждение, действуя как микроохладильники. Нерасплавившиеся частицы порошка становятся дополнительными центрами кристаллизации и способствуют формированию структуры с мелкими, различно ориентированными зёрнами.

Были проведены исследования образцов, наплавленных порошком стали 10P6M5. Скорость наплавки составляла 12 м/ч, подача порошка - 4,1 кг/ч. Присадочный порошок представлял собой смесь мелкой (80...125 мкм) и более крупных фракций (200...250 и 315...400 мкм). Исследования показали, что эффект изменения структуры проявляется при наплавке смесями с долей крупных частиц от 15 до 30%. Добавка к мелкозернистому порошку фракции 200...250 мкм вызывает появление в сварочной ванне дополнительных центров кристаллизации и структуры с разориентированными дендритами небольших размеров. Фракции порошка 315...400 мкм ускоряют охлаждение всего объема сварочной ванны. Структура наплавленной стали заметно измельчается, а карбидная сетка становится очень тонкой при содержании крупных фракций около 30%.

Для приближенной оценки величины гранул порошка, которые не расплавляются в сварочной ванне при оптимальных режимах плазменной наплавки и могут стать центрами кристаллизации, были проведены расчеты, при которых плазменная дуга рассматривалась как источник тепла со средним удельным тепловым потоком q_c . Скорость нагрева порошка в дуге зависит от величины удельного теплового потока, формы и величины частиц, теплофизических свойств металла порошка.

Для сферической частицы порошка можно вывести формулу, определяющую её предельный диаметр d_c :

$$d_c = 6 q_c l / \{V \gamma [c (T_{пл} - T_n) + L]\},$$

где q_c - средний удельный тепловой поток, Дж / (м²*с);

c - удельная теплоемкость материала порошка, Дж / (кг*К);

γ - плотность быстрорежущей стали, кг / м³;

$T_{пл}$ - температура плавления материала порошка, К;

T_n - начальная температура порошка, К;

L - скрытая теплота плавления порошка, Дж / кг.

Средний удельный тепловой поток q_c приближенно равен:

$$q_c = \eta_u U_d I_d / F,$$

где η_u - эффективный к.п.д. плазменной дуги;

F - сечение столба дуги, м².

Результаты расчетов, выполненных для скоростей полета частиц порошка от 2 до 10 м/с при силе тока плазменной дуги от 180 до 240 А показали, что расплавление частиц присадочного порошка сильно зависит от скорости их движения в плазменной дуге и в меньшей степени – от силы тока дуги. При характерных скоростях полета частиц порошка и значениях тока дуги возможно попадание в сварочную ванну нерасплавившимися наиболее крупных частиц порошка.

Исследование первичной кристаллизации при плазменно-порошковой наплавке было проведено на физических моделях. В экспериментах использовались смеси азотно-кислых солей калия и натрия, которые плавятся при температурах 337 и 310 °С соответственно и имеют относительно невысокую скорость кристаллизации. Было выявлено влияние на образующуюся первичную структуру модели сварочной ванны крупных частиц солей. Замечено также, что дополнительными центрами кристаллизации становятся только те частицы, форма которых близка к сферической.

Изучено влияние амплитуды и частоты колебаний плазмотрона на формирование наплавленных валиков, характер проплавления основного металла, а также на структурную и химическую неоднородность в зоне соединения наплавленного и основного металлов. Наиболее значительное влияние на форму валика и его микроструктуру оказывает амплитуда колебаний плазмотрона. Микроструктура наплавленного металла при значениях амплитуды колебаний плазмотрона 0...3 мм отличается крупным зерном. При амплитуде 5 мм и более значительно возрастает доля мелких, почти равноосных зерен, которые при наплавке без колебаний присутствуют лишь в незначительных количествах вблизи линии сплавления и в поверхностной зоне валиков. Кристаллическая структура наплавленного металла – дендритная, во впадинах наплавленный металл имеет более дисперсную ячеистую структуру. Столбчатые кристаллиты прорастают от линии сплавления с основным металлом к поверхности образца и имеют ширину 15...20 мкм.

Линия сплавления наплавленного и основного металла так же имеет волнистый характер, но с бóльшей частотой выступов и впадин, чем в наплавленном валике с меньшей частотой колебаний, что объясняется более высокой частотой колебаний плазмотрона. По линии соединения со сталью Ст3 наблюдается тонкий слой переменной ширины от 2 до 20 мкм. Ширина ЗТВ составляет 4200...4500 мкм. Четко видны вытянутые кристаллиты, которые расположены перпендикулярно к линии сплавления и которые имеют ширину 15...20 мкм. Микроструктура наплавленного металла состоит из мартенсита и остаточного аустенита.

Выводы

1. Центрами кристаллизации при плазменно-порошковой наплавке являются зерна основного металла, как при обычной сварке или наплавке, и наиболее крупные частицы присадочного порошка в форме сферических гранул.
2. Образование дополнительных центров кристаллизации измельчает структуру и придает ей разориентированный характер.
3. Исследование влияния частоты колебаний плазмотрона на структурную неоднородность металла, наплавленного плазменно-порошковым методом, показало, что при увеличении частоты колебаний плазмотрона с 40 до 90 мин⁻¹ происходит лучшее перемешивание слоев наплавленного металла и выравнивание и измельчение структуры по его сечению.
4. С увеличением частоты колебаний плазмотрона, и на выступах, и на впадинах на границе сплавления уменьшается перемешивание наплавленного и основного металлов и содержание основных легирующих элементов на этой границе меняется практически скачкообразно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ЛЕЖАЧИМ ЭЛЕКТРОДОМ С ЛЕГИРУЮЩЕЙ Fe-Mn ШИХТОЙ

И.А. БАРТЕНЕВ

Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан
E-mail: igor_svar@mail.ru

Способность металла противостоять разрушению при ударно-абразивном изнашивании является функцией многих параметров: химического состава, структурного состояния сплава, чувствительности к структурным изменениям в поверхностном слое при взаимодействии с абразивными телами, условий изнашивания, включающих температуру, величину энергии удара, скорость соударения, состав и свойства измельчаемого материала.

Влияние микроструктуры сталей на их сопротивление разрушающему действию абразивных частиц наиболее полно проявляется в способности остаточного аустенита под воздействием абразивных зерен к превращению в мартенсит деформации, что приводит к существенному упрочнению металла. Для сталей, работающих в динамическом режиме нагружения, рекомендуемое количество остаточного аустенита составляет 12 - 13%. В составе применяемых сплавов содержание углерода, марганца и хрома колеблется в довольно широких пределах. Так, например, диапазон изменения содержания углерода составляет 0,7 - 2,0% (ПП-АН170 и ПП-АН125), хрома 15 - 26% (ВСН6 и сормайт-1) и марганца 0,3 - 13% (сормайт-1 и ПП-Г13). Большинство износостойких сплавов на железной основе, широко применяемых на практике, имеет матрицу, легированную хромом, который повышает износостойкость сплавов. Рекомендуемое количество хрома в современных наплавках доходит до 40%.

Высокомарганцевые аустенитные стали, содержащие до 13% Mn, обладают высокой стойкостью против ударов и способностью наклёпываться, в результате чего твердость их поверхности возрастает до 450-500 НВ, при этом сердцевина остается вязкой. Этими сталями наплавляют детали дробильно-размольного оборудования, железнодорожные крестовины и другие изделия, работающие в условиях абразивного износа с ударными нагрузками.

Чтобы реализовать замечательные свойства сталей этой группы - пластичность сердцевины и высокую твердость на рабочей поверхности, необходимо получение аустенитной структуры и последующее воздействие на рабочую поверхность ударов и давлений, вызывающих пластическое деформирование. В противном случае наплавленный металл не будет обладать преимуществами перед низкоуглеродистыми сталями. Наплавка высокомарганцевых аустенитных сталей должна сопровождаться достаточно высокой скоростью охлаждения в интервале температур 800-500°C с целью фиксации такой структуры.

Дуговую наплавку лежачим пластинчатым электродом осуществляют посредством зажигания дуги между наплавляемым изделием и пластиной, уложенной на прослойку гранулированного флюса толщиной 3...5 мм. Дуга по мере оплавления электрода перемещается, вызывая его расплавление и наплавку соответствующего количества металла на изделие. При надлежащей подготовке процесс происходит достаточно устойчиво.

Лабораторные эксперименты производились в Учебном центре «Сварка» КарГТУ. На образец из стали Ст.3 размером 300x150 мм и толщиной 10 мм равномерно засыпался слой сварочного флюса АН-348А толщиной 2...3 мм, по площади соответствующий пластинчатому электроду.

Электродуговую наплавку осуществляли на лабораторной установке с использованием «твердого» старта. В качестве источников питания применяли выпрямитель ВДМ-1202С с жесткой внешней вольт-амперной характеристикой. В качестве пластинчатых электродов использовались пластины из стали Ст 3. Масса наплавляемого порошкового сплава марганца варьировалась от 20 до 50 граммов. Наплавку производили под флюсом АН-348А. Параметры режима наплавки в процессе старта изменялись в следующих пределах: ток наплавки от 280 до 350А; напряжение от 28 до 36 В; сечение пластинчатого электрода от 50

до 80 мм², время от 35 до 80 секунд. В результате наплавки получили наплавленные валики шириной от 15 до 25 мм и высотой от 5 до 8 мм. Из них вырезали образцы для исследования микроструктуры и определения твердость наплавленного слоя. Твердость наплавленного валика составила 47-52 HRC.

В качестве легирующего элемента применялся сплав марганца казахстанского производства, содержащий: С 1,7%; Мн 86%; Si 2,0%; Fe – остальное.

В результате экспериментов был определен диапазон величины тока (260-400 А), обеспечивающий устойчивость процесса в режиме старта. При значениях тока менее 300 А происходило несплавление наплавленного валика по его краям из-за недостаточного тепловложения в наплавляемую деталь. При увеличении тока свыше 400 А из-за высокой скорости наплавки процесс стартовой операции был трудно контролируемым, что зачастую приводило к закорачиванию электрода на наплавляемую деталь. Основными факторами, определяющие процесс стартовой операции, являются: напряжение дуги (U), ток дуги (I), площадь сечения электрода (S).

При проведении лабораторных экспериментов было выявлено:

- на твердость наплавленного металла влияет толщина слоя сплава марганца. С увеличением толщины слоя сплава марганца повышается твердость наплавленного металла, при ее уменьшении твердость понижается;

- с повышением сварочного тока твердость наплавленного металла понижается. Это вызвано тем, что с увеличением сварочного тока глубина проплавления основного металла и смешивание легирующего и основного металлов увеличиваются, что снижает твердость наплавленного валика;

- зависимость проплавления основного металла от плотности тока. С увеличением плотности тока глубина проплавления основного металла увеличивается, что противоречит требованиям наплавки;

- зависимость твердости от проплавления основного металла. С увеличением проплавления основного металла твердость наплавленного слоя уменьшается, что вызвано перемешиванием основного металла с легированным присадочным;

- зависимость проплавления основного металла от напряжения дуги. Напряжение в незначительной мере влияет на проплавление основного металла.

Металлографические исследования показали, что незначительное проплавление поверхности детали наблюдается только по краям наплавленного валика при четкой границе сплавления в средней части сечения валика. В микроструктуре наблюдаются весьма мелкие дендриты, растущие от поверхности основного металла, с большим содержанием аустенита и мартенсита.

Выводы

1. Определены параметры устойчивого процесса наплавки с комбинированным присадочным материалом.
2. Определены оптимальные составы комбинированного присадочного материала (пластинчатый электрод + порошок ферромарганца) для наплавки металла типа стали Г13.
3. Разработана простая и недорогая технология наплавки плоских деталей с использованием комбинированного присадочного материала из казахстанского сырья.

ВЫБОР ТОЛЩИНЫ СВАРНОГО ШВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ СТЫКОВЫХ И УГЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Т.И. БЕНДИК

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Email: bendik@bntu.by

В Республике Беларусь активно идет процесс обновления нормативно-технической базы, который затрагивает различные отрасли: строительство, энергетику, машиностроение и транспорт.

Целью данной работы является сравнительный анализ выбора толщины сварных швов стыковых и угловых соединений при расчете на статическую прочность по ранее существовавшим и вновь введенным нормам проектирования (ТКП EN, СТБ EN, СТБ ISO).

На текущий момент в Республике Беларусь действующими являются два терминологических стандарта, сравнение отдельных положений которых представлено на рисунок 1.

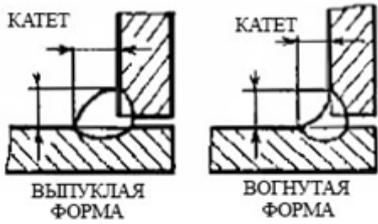
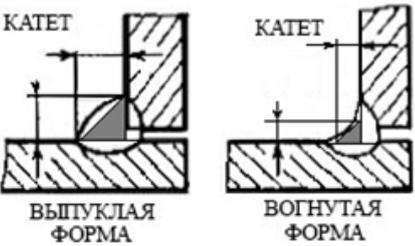
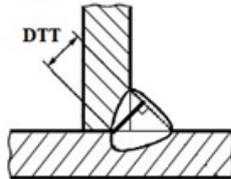
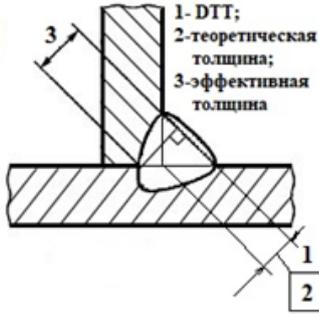
ГОСТ 2601-84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий»	СТБ ИСО 17659-2005 «Сварка. Сварные соединения. Термины и определения»
<p>1 катет углового шва (fillet weld leg) - кратчайшее расстояние от поверхности одной из свариваемых частей до границы углового шва на поверхности второй свариваемой части</p> 	<p>1 катет углового шва (leg length) – сторона наибольшего равнобедренного треугольника, который можно вписать в сечение шва</p> 
<p>Комментарий: из рисунков видно, что при вогнутой форме шва наблюдаются противоречия в определении размера катета согласно вышеприведенным стандартам</p>	
<p>2 расчетная высота углового шва DTT (design throat thickness) - длина перпендикуляра, опущенного из точки максимального проплавления в месте сопряжения свариваемых частей на гипотенузу наибольшего вписанного во внешнюю часть углового шва прямоугольного треугольника</p> 	<p>2 проектная толщина шва DTT (design throat thickness) – толщина шва, установленная проектировщиком</p> 
— —	<p>3 теоретическая толщина углового шва (actual throat thickness fillet weld) – высота наибольшего равнобедренного треугольника, который можно вписать в сечение шва</p>
— —	<p>4 эффективная толщина шва (effective throat thickness) – размер, который определяет передачу нагрузки и зависит от формы и глубины проплавления шва</p>

Рисунок 1 – Сравнение терминологических стандартов

Технологически (в зависимости от способа, положения сварки и т.д.) угловые швы могут быть выполнены с глубоким проплавлением и без глубокого проплавления. У конструктора есть возможность установить проектную толщину шва DDT равной либо

теоретической, либо эффективной толщине. Но на практике для угловых швов чаще всего выбирают минимально гарантированную – т.е. теоретическую (без учета глубокого проплавления), что приводит к перерасходу сварочных материалов. Также это обусловлено тем фактором, что теоретическая толщина шва может быть определена визуально-измерительным контролем, а эффективная толщина – только разрушающим методом контроля (металлографическим анализом).

Расчетная высота угловых швов с разделкой кромок показана на рисунок 2, из которого видно, что выпуклая форма углового шва с полным проплавлением не дает значительного увеличения расчетной толщины таких швов. Попытка «усиления» угловых швов с полным проплавлением путем наложения дополнительного катета приводит лишь к заметному увеличению массы наплавленного металла и расходу сварочных материалов. Кроме того наплавка дополнительных кольцевых швов создает объемное напряженное состояние и снижает технологическую прочность сварного соединения.

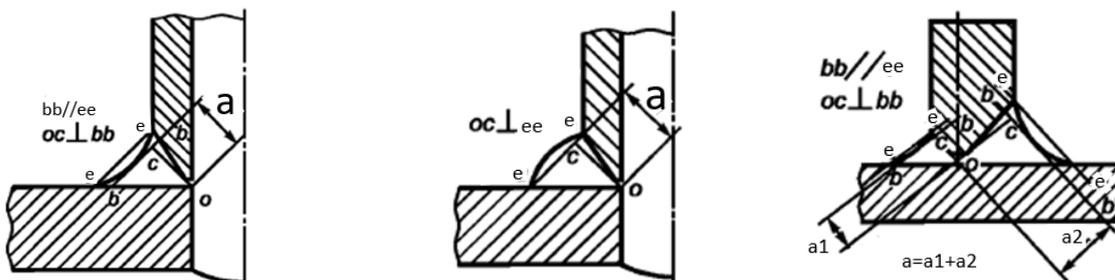


Рисунок 2 – Расчетная толщина шва для угловых швов с разделкой кромок

Методики прочностных расчетов сварных соединений, изложенные в ТКП EN 1993–1–8–2009 «Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Расчет соединений», включают следующие расчетные ситуации.

1. Швы, которые выполнены с конструктивно гарантированным полным проплавлением. В этом случае обеспечена расчетная толщина шва a_w не менее толщины соединяемых встык деталей (рисунок 3) или не менее толщины примыкающего элемента t в тавровых и угловых соединениях (рисунок 4).

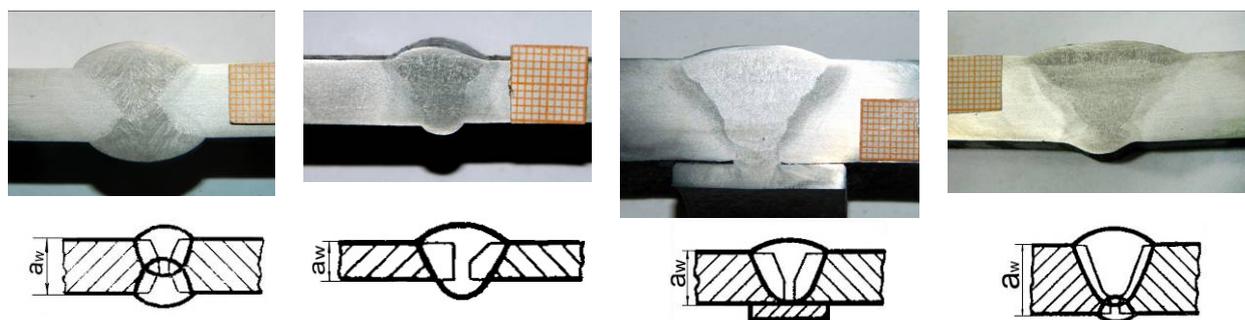
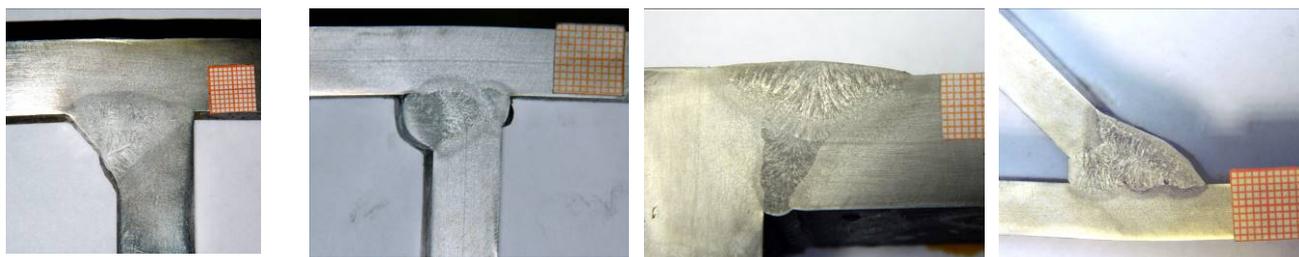


Рисунок 3 – Стыковые соединения с конструктивно гарантированным полным проплавлением



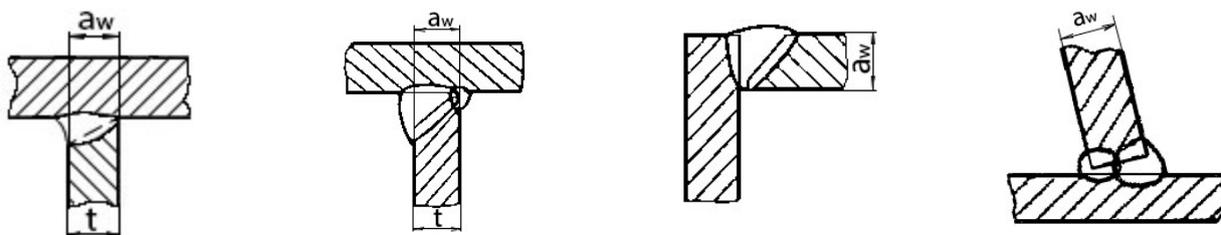


Рисунок 4 – Швы в тавровых и угловых соединениях с полным проплавлением

2. Швы, которые выполняются с конструктивно неполным проплавлением.

В данных сварных соединениях расчетная толщина шва a_w определяется технологически обеспечиваемой глубиной проплавления (рисунок 5).

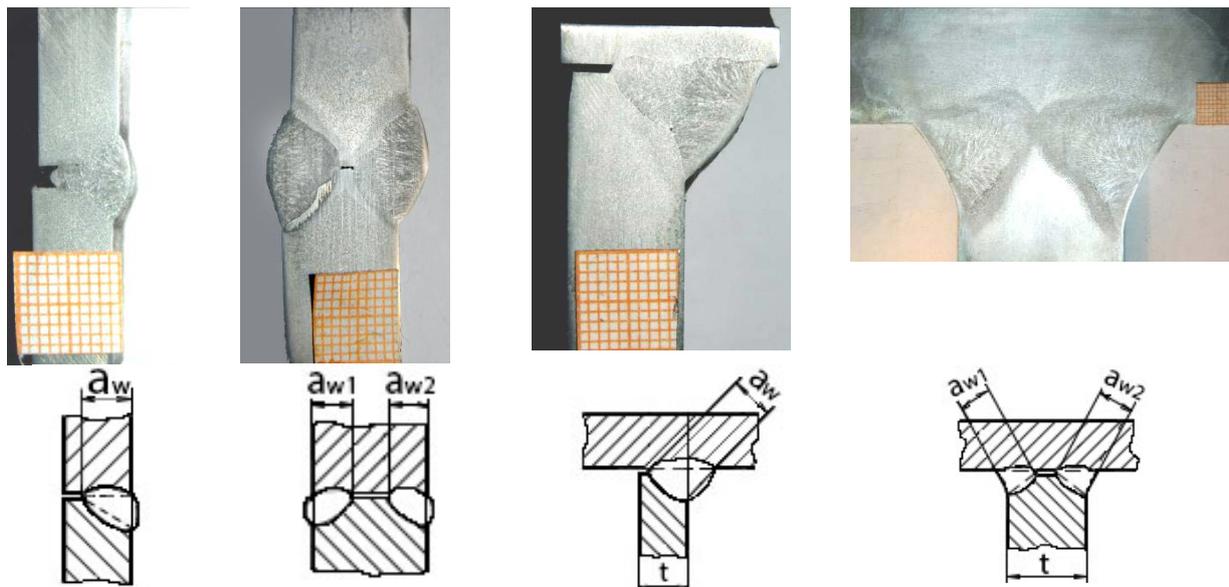


Рисунок 5 – Сварные соединения с конструктивно неполным проплавлением

3. Сварные швы, несущая способность которых может быть корректно определена не расчетом, а исключительно механическими испытаниями (рис. 6).

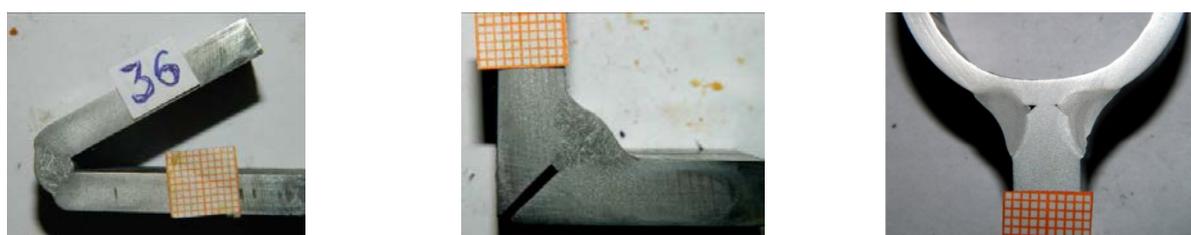


Рисунок 6 – Примеры нестандартных сварных соединений

Представленный анализ расчетных ситуаций может быть использован для выбора надлежащего типа сварного соединения с соответствующими классами безопасности и нагрузки при решении проектных и конструкторских задач. Рассмотренные аспекты задания расчетной толщины шва могут быть использованы для снижения расхода сварочных материалов и уменьшение металлоёмкости сварных конструкций.

Целесообразность и возможность назначения определённого класса эксплуатации сварных швов необходимо согласовывать с ответственным координатором сварки. Только в этом случае можно быть уверенным, что требуемая расчетная высота шва, как основной параметр определяющий его прочность, может быть технологически обеспечена при его выполнении заданным способом сварки.

ОЦЕНКА РИСКА - КЛЮЧ К СОЗДАНИЮ БЕЗОПАСНОГО РАБОЧЕГО МЕСТА В ТИТАНОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ю.К. БОНДАРЕНКО, Ю.В. ЛОГИНОВА, О.В. КОВАЛЬЧУК, К.О. АРТЮХ

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, г. Киев, Украина

E-mail: paton@seproz.ru.kiev.ua

Актуальность проблемы принятия эффективных управленческих решений относительно функционирования предприятий в условиях повышенного риска, являющаяся неотъемлемой характеристикой рыночных отношений, стремительно растет. Это в полной мере касается производителей титана, т.к. предприятия — поставщики стратегического сырья для военного производства, из-за политических факторов (внешние политические риски) потеряли традиционных потребителей продукции.

Поэтому перед украинскими производителями титана встала задача как можно быстрее внедрить европейские стандарты по управлению и организации производством с целью приведения их в соответствии с международными и европейскими требованиями, базирующимся на риск-ориентированном подходе.

Успех в деле оценки и минимизации рисков гарантирован тем предприятиям, где наряду с хорошим законодательством имеет место качественное информационное обеспечение, внедрение механизмов и распространение знаний по оценке рисков.

Важной составляющей интеграции с ЕС является вопрос охраны труда и сохранение здоровья работников. Это одни из тех ключевых моментов экономической интеграции с ЕС, который важен для всех заинтересованных сторон, задействованных в процессе создания материальных ценностей и прежде всего для работников, испытывающих влияние опасностей, связанных с производственными процессами например, такими как производство титана.

Развиваясь в рамках рыночной экономики, правительства стран ЕС должны быть уверены, что экономика будет развиваться без нанесения вреда здоровью людей, а также без травматизма и несчастных случаев. Это положение в полной мере касается и производства титана. Должна быть прозрачная гарантия: если что-то и случится, то потерпевшие должны быть надежно защищены в рамках системы социальной государственной защиты в Украине.

Оценка рисков очень важна и для бизнеса — если работодатели заботятся о безопасных условиях труда, они гарантировано получают постоянное развитие — как производства титана так и бизнеса. Как показали время и опыт — ключевой момент этой интеграции заключается в том, что все нормативные документы (НД), касающиеся безопасных условий труда на титановом производстве, единые для всех стран.

Производственные риски, с которыми сталкиваются работодатели, со временем изменяются. Например, раньше одним из наибольших рисков — опасных отраслей в ЕС была угледобывающая. На сегодня ее почти полностью реформировали, фактически сократили, поэтому неактуальными стали и риски угледобычи.

Как свидетельствует статистика, имеет место рост несчастных случаев в сфере технических услуг. Как показали исследования в последнее время наиболее высокие риски несут так называемые сложные клиенты. Это стало предметом серьезного обсуждения и наработок новых подходов в ЕС к решению данной проблемы.

Новые риски возникают в т.ч. при смене технологий, что в свою очередь приводит к изменениям в производстве. Скажем, внедрение нанотехнологий, разных новых материалов (в т.ч. выплавка титана) — это дополнительные риски и угрозы для условий работы.

Следующий вызов для нас — смена природы занятости в Украине. Люди вынуждены очень часто менять место работы в разных странах. По оценке экспертов у почти 10% предприятий большая часть их работников выполняет свою работу и после смены или дома, где вообще не может быть никакого контроля за работающими.

С другой стороны, рабочая сила в Европе стареет. Больше половине рабочих мест в ЕС занимают люди в возрасте старше 55 лет. Если говорить про перспективу, то ожидается, что условия и природа занятости будут изменяться в будущем значительно сильнее чем сейчас.

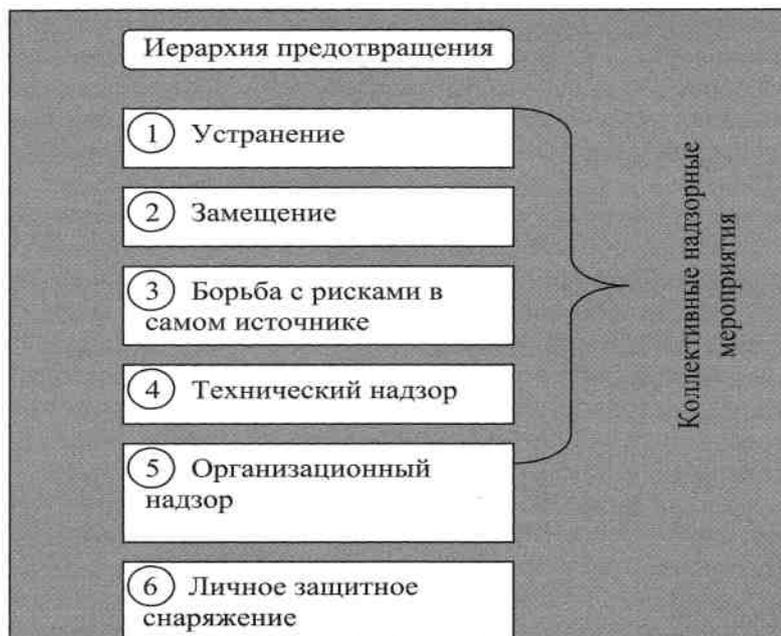
Как ЕС справляется со всеми рисками и вызовами? Благодаря своей законодательной базе.

Директива 89/391/ЕЭС «О введении мер, содействующих улучшению безопасности и гигиены труда работников на производстве» — это рамочная директива, содержащая требование ко всем работодателям оценивать риски и принимать меры для предупреждения несчастных случаев и социальной защиты работников. Значительную роль в функционировании системы управления рисками играют также ДСТУ ISO 9001:2015, ДСТУ ISO 31000, ДСТУ ISO 31010.

В законодательстве ЕС есть специальное определение для особых рисков и предложены некоторые решения относительно них. Идея оценки рисков была рождена работодателем. Она заключается в том, чтобы перейти от системы, когда законодательство на каждом шагу диктует работодателю что делать, к системе, где бизнес и работники определяют, каким образом работать относительно оценки рисков, введение предупреждающих мер и невозможность несчастных случаев.

Законодательством четко не определено, что такое та или иная опасность, но одновременно предусмотрено, что одна из лучших превентивных мер — распространение информации, осведомленность в этих вопросах работников и бизнесменов, а также предоставление информации про лучшие меры. Своеобразный обмен опытом, применяемый для предотвращения несчастных случаев.

Если суммировать рассмотренное выше, оценка рисков является ключевым моментом для создания безопасных для здоровья рабочих мест на титановом производстве, состоящее из определения опасностей, существующих рисков, путей их предотвращения. Исходим из того, что технологично невозможно избежать всех рисков, в т.ч. всех рисков на титановом производстве. Но нужно провести плодотворную коллективную работу относительно их предотвращения и устранения, и не только на конкретном рабочем месте, а и на производстве в целом (рисунок 1).



Следующее направление предотвращения несчастных случаев на титановом производстве — обучение по вопросам охраны труда, которое нужно проводить для всех без исключения работников предприятия. Учебный процесс включает также консультации. Предотвращение рисков требует консультаций, которые должны проводить не только менеджмент или управленцы, но и опытные работники, хорошо знающие с чем именно они встречаются каждый день. Не нужно забывать и про средства индивидуальной защиты.

В последнее время отдельные предприятия все чаще проводят оценку рисков. При анализе рабочих мест с наилучшими мерами охраны труда и здоровья на первый план выходят два ключевых момента — лидерство и желания менеджмента внедрять предупреждающие меры, а также непосредственное участие работников титанового производства во внедрении этих мероприятий.

Страны ЕС по-разному внедряют на практике указанную выше рамочную директиву. Политика мер безопасности существует на 90% предприятий стран-членов ЕС, но разница заключается в том, каким образом предприятия используют внешние ресурсы для оценки рисков. Политика части предприятий ЕС относительно предотвращения несчастных случаев на производстве включает внутреннюю оценку рисков на рабочем месте. На других предприятиях для проведения оценки рисков на рабочих местах гораздо чаще привлекают внешних исполнителей. Это важный момент, но нужно помнить, что никто не снимал с работодателей их обязанности придерживаться правил безопасности труда. Оценка рисков на производстве работодателями — самый простой путь избежать рисков.

Очень важный момент относительно некоторых рисков, которые трудно оценить: сколько будет стоить их устранение и как это увязывается с тем, окупится их отсутствие или нет.

Таким образом, успех в оценке и минимизации рисков гарантирован тем предприятиям, где вместе с хорошим законодательством имеют место качественное информационное обеспечение, внедрение механизмов и распространение лучших мер по оценке рисков.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНОЙ СБОРКИ¹

О.А. БОЧАРОВА, В.С. ТЫНЧЕНКО, А.В. МУРЫГИН, А.Н. БОЧАРОВ, Т.Г. ОРЕШЕНКО

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева,
г. Красноярск
E-mail: shyx_89@mail.ru

Для обеспечения функционирования космического аппарата и его бортовой аппаратуры в соответствии с заданной программой применяются системы волноводных трактов, состоящие преимущественно из алюминиевых сплавов с улучшенными массогабаритными и электротехническими параметрами [1]. При сборке элементов волноводных трактов, а именно тонкостенной трубы прямоугольного сечения, муфты и фланца применяется индукционная пайка. Применение данного способа пайки позволяет получать паяные соединения волноводных труб с толщиной стенки от 0,5 «мм» с более массивными фланцами (толщиной до 7 «мм»), муфтами и уголками [2]. Индукционная пайка тонкостенных волноводных трактов из алюминиевых сплавов – сложный технологический процесс, обладающий рядом особенностей:

- малая разница температур плавления одного из применяемых силуминовых припоев и температуры плавления основного материала элементов сборки, при средней скорости индукционного нагрева 10–15 «°С/с», требует точной отработки и воспроизведения технологических режимов [3];

- нагрев элементов волноводной сборки происходит независимо друг от друга, так как между ними практически отсутствует теплопередача за счет теплопроводности вплоть до момента расплавления припоя;

- разнотолщинность паяемых изделий, допуски на размеры применяемых особо тонкостенных волноводных труб (толщина стенок от 0,5 «мм») приводят к разности по массе одноименных изделий до 25 % (для волноводных труб);

- применяемые для производства элементов волноводных трактов алюминиевые сплавы практически не изменяют цвет в процессе нагрева, что делает невозможным визуально контролировать наличие локальных перегревов паяемых изделий;

- из-за некоторых особенностей индукционного нагрева зоны с максимальной плотностью индуцированных вихревых токов, следовательно, и зоны наибольшего тепловыделения в сечениях паяемых элементов волноводных трактов не совпадают с зонами пайки;

- равномерный нагрев паяемых элементов обеспечивается за счет подбора оптимальных технических параметров оборудования, особенно это касается формы индукторов и рабочей частоты и мощности генератора [4].

Перечисленные выше факторы значительно усложняют отработку и последующее воспроизведение технологического процесса индукционной пайки, оказывают влияние на стабильность качества выпускаемой продукции, требуют высокой квалификации задействованного в производстве персонала. Для снижения влияния указанных особенностей процесса индукционной пайки необходимо разработать систему автоматизированного управления процессом индукционной пайки, для ее корректного функционирования требуется разработка ряда математических моделей, описывающих индукционный нагрев отдельных структурных элементов сборки волноводного тракта (трубы и фланца/муфты) или изделия в целом.

¹ «Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Математическое и физическое моделирование процессов, происходящих при индукционной пайке трубопроводов в защитных средах», проект № 18-48-242006

Так как волноводный тракт состоит из трубы, муфты и фланца проводится моделирование нагрева этих отдельных элементов волноводной сборки. Данное моделирование основывается на уравнении термодинамики, законе теплового баланса [5].

В качестве математической модели нагрева трубы выступает уравнение нагрева бесконечного стержня с учетом типоразмеров труб и их полости.

Нагрев фланца можно рассматривать как процесс нагрева короткого стержня имеющего две адиабатические границы по краям.

Для описания математической модели фланца используется модель бесконечного стержня в дополнении методом стоков и истоков, который позволяет вводить фиктивные источники теплоты, на границах тела. Тем самым позволяя производить расчет температурного поля в ограниченном теле любой геометрической сложности [6].

Разработанные модели согласуются с данными, полученными экспериментальным путем, в результате чего данные модели могут использоваться при создании системы автоматизированного управления процессом индукционной пайки волноводных сборок.

Список литературы

1. Эмилова О.А., Тынченко В.С. Индукционная пайка: процесс и его особенности // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2016. – Т.2. – С. 173-174.
2. Злобин С.К. Пайка тонкостенных волноводных трактов из сплавов на основе алюминия с использованием индукционного нагрева // Решетневские чтения: материалы XIV Юбилейной междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2010. – Т. 1. – С. 59-60
3. Лаптенко В.Д. Особенности производства волноводно-распределительных трактов антенно-фидерных устройств космических аппаратов // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 6(52). – С. 196-201.
4. Тынченко В.С. Автоматизированное оборудование и технология для пайки волноводных трактов космических аппаратов / В.С. Тынченко, С.К. Злобин, М.М. Михнев, В.Д. Лаптенко, Ю.Н. Серегин, А.Н. Бочаров, Ю.П. Дубец, Б.Б. Долгополов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 4(56). – С. 219-229.
5. Murygin A. V. et al. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2017. – Т. 173. – №. 1. – P. 012026.
6. V. S. Tynchenko, A. V. Murygin, V. E. Petrenko, O. A. Emilova and A. N. Bocharov Optimizing the control process parameters for the induction soldering of aluminium alloy waveguide paths // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2017. – P. 012017.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НАГРЕВА НА ДИНАМИКУ СИНТЕЗА КОМПОЗИТОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Н.В. БУКРИНА, А.Г. КНЯЗЕВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: bookr81@mail.ru

Перенос тепла является одним из основных процессов, играющих важную роль в формировании структуры материалов и их поверхностей. Цель любого вида высокотемпературного процесса состоит в получении нового вида материала или соединения, которые бы обладали наилучшими свойствами и имели малую себестоимость.

Механические, физико-химические и эксплуатационные свойства материалов и изделий, подвергнутых воздействию высокоэнергетического источника, во многом определяются тепловым режимом воздействия или такими тепловыми параметрами, как температурное поле, термический цикл, скорости нагрева и охлаждения. Поэтому выделение типов источников нагрева оказывается важным. Как правило, в литературе выделяют распределенные и точечные; поверхностные и объемные; неподвижные и движущиеся; непрерывные и импульсные источники тепла.

Действие внешнего нагрева различными источниками энергии может привести к инициированию реакции в образце, что обсуждалось разными авторами [1,2].

Традиционный подход к решению задач теплопроводности, соответствующих условиям эксперимента, заключается во введении понятия эффективного теплового источника для самых разных процессов обработки, что позволяет в них выделить общую закономерность и специфику. В качестве параметров в эффективный тепловой источник входят теплофизические и оптические характеристики материала. В этом случае температурное поле является единственной независимой характеристикой, через которую определяются все остальные: движение фазовых границ, скорость протекания химических реакций, массоперенос легирующих примесей и т.д.

Возникает необходимость анализа наблюдаемых и предсказания возможных фазовых и структурных превращений в материалах под воздействием различных видов воздействия методами математического моделирования, которые дают возможность получения необходимой качественной и количественной информации о скоростях нагрева и охлаждения, временах достижения температуры плавления и испарения при различных заранее заданных условиях проведения экспериментальных исследований.

В работе предложена двумерная математическая модель высокотемпературного синтеза химических соединений и сплавов в режиме динамического теплового взрыва при нагреве порошковой прессовки в стальной цилиндрической пресс-форме различными способами (рис.1). Химические реакции описываются суммарной схемой. Кинетический закон учитывает сильное торможение скорости суммарной реакции с накоплением продукта синтеза.

Математическая постановка задачи включает двумерное уравнение теплопроводности для смеси порошков в виде

$$(c\rho)_A \frac{\partial T_A}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_A r \frac{\partial T_A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_A \frac{\partial T_A}{\partial z} \right) + W_H + W_{ch}.$$

В это уравнение входят слагаемые, учитывающие тепловыделение за счет химических реакций, а также, учитывается нагрев за счет электрических полей. Для стенок реактора, дна и пуансона записывается аналогичное уравнение без источниковых слагаемых.

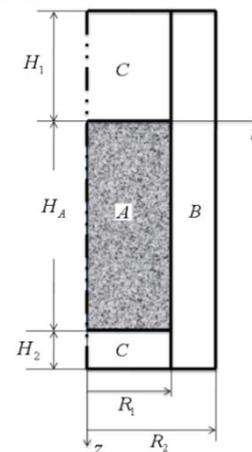


Рисунок 1 - Схематическое изображение процесса синтеза композита в режиме теплового взрыва при нагреве порошковой прессовки в стальной пресс-форме-реакторе

Тепловой контакт между материалами идеальный. В центре ставится условие симметрии.

В случае нагрева токами высокой частоты от индуктора на границе R_2 задается поток тепла вида

$$r = R_2 : -\lambda_B \frac{\partial T_B}{\partial r} = \sigma \varepsilon_B (T_W^4 - T_B^4) - \alpha_B (T_B - T_e)$$

где T_W – изменение температуры, с которой соприкасается внешняя стека реактора, найденное из решения отдельной электромагнитной задачи [3].

Если же нагрев реагента происходит теплопроводностью за счет нагрева поверхностей дна $z = H_A + H_2$ и пуансона $z = -H_1$, то на этих границах в области $0 \leq r \leq R_1$ задается температура $T = X_C$.

Также в модели возможен учет теплопотерь со всех поверхностей по законам Стефана – Больцмана и Ньютона.

Задача решалась численно с помощью неявной разностной схемы и метода прогонки.

Далее представлены примеры расчетов для различных вариантов нагрева без учета теплопотерь и тепловыделения за счет химической реакции (рис.2).

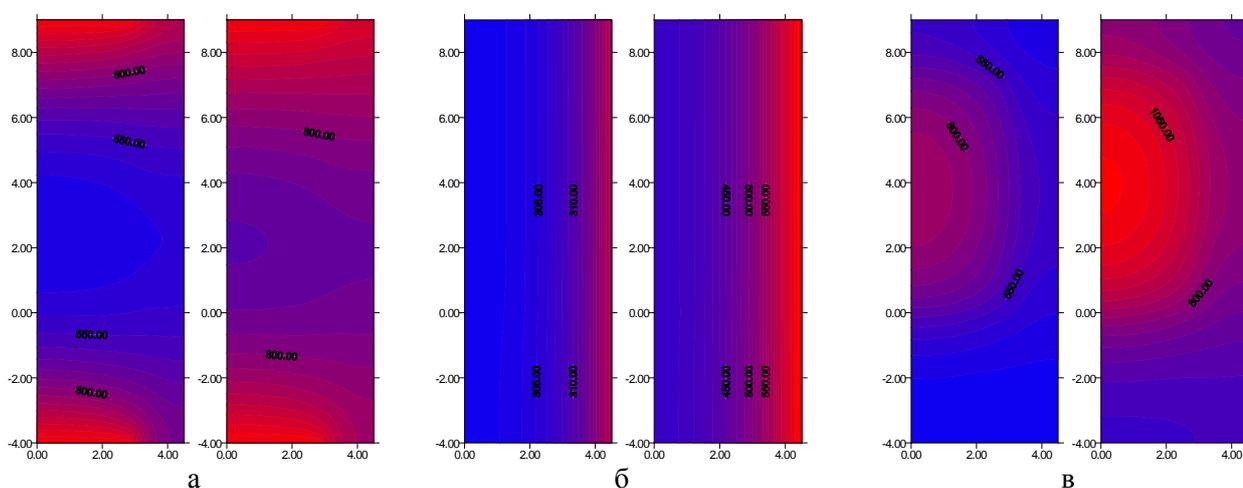


Рисунок 2 - Поле температуры в моменты времени 90 (слева) и 200 с (справа) для различных вариантов нагрева. Рис.а. соответствует нагреву дна и пуансона, б – токами высокой частоты от индуктора, в – объемный источник (за счет джоулева нагрева)

Очевидно, что в разных условиях нагрева создаются разные условия для инициирования реакции. В случае рис.2 а) пуансон и дно служат источниками тепла, в случае рис.2 б) обеспечивается однородный нагрев с боковых поверхностей (однако неоднородно по объему образца); в случае рис.2 в) пуансон и стенки реактора являются стоками тепла.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2018-2020, проект № 23.2.2.

Список литературы

1. Qin L., Hu J. et. all Effect of Al Content on Reaction Laser Sintering of Ni–Al Powder // Science of Sintering. – 2008. – Vol. 40. – pp. 295-301.
2. M.Shekari, M.Adeli et. all Induction-activated self-propagating, high-temperature synthesis of nickel aluminide //Advanced Powder Technology. – 2017. – Vol. 28. – № 11. – pp. 2974-297.
3. Букрина Н.В., Князева А.Г., Овчаренко В.Е. Математическая модель высокотемпературного синтеза интерметаллического соединения NI_3AL в режиме теплового взрыва порошковой прессовки исходных элементов стехиометрического состава // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий: материалы III Всероссийского научного семинара с международным участием – Томск, 2018. – С. 3-9.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВСТАВКИ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ, СФОРМИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКОЙ, ДЛЯ СВАРКИ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛЕЙ Э76 И 110Г13Л

Т.А. БУРЕНКОВА, А.С. ЛЮБАР, А.С. ФЕДОРИНО, А.А. НИКУЛИНА, М.В. РАШКОВЕЦ

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

E-mail: Tasha_27.96@mail.ru

Комбинированные конструкции характеризуются сочетанием разнородных материалов, в том числе разнородных сталей. Ярким примером такой конструкции является сварная железнодорожная крестовина, где происходит соединение материалов, из которых изготовлены крестовины и рельсы. Основным способом формирования комбинированного соединения крестовины и рельсовых окончаний заключается в стыковой контактной сварке методом пульсирующего оплавления, что ускоряет нагрев изделий и снижает время процесса более чем вдвое по сравнению со сваркой с подогревом и даже непрерывным оплавлением. Основной проблемой при сварке данных заготовок является различие в условиях охлаждения, подходящих для углеродистой и аустенитной сталей. В первом случае необходимо умеренное охлаждение, во втором - ускоренное. Поэтому для сварки данных сталей используют вставку из стали 12Х18Н10Т, которая позволяет последовательно сварить данные заготовки. Вставку длиной 600 – 700 мм обычно изготавливают вертикальной заливкой расплавленного металла в формы.

Использование технологии наплавки позволяет существенно ускорить процесс формирования вставки. Целью данной работы являлось изучение особенностей строения вставки для сварки сталей Э76 и 110Г13Л, сформированной электронно-лучевой наплавкой.

В работе анализировали комбинированные конструкции, полученные вневакуумно-лучевой наплавкой порошковой смеси $42\text{Cr}+24\text{Ni}+2\text{Ti}$ с флюсом $24\text{CaF}_2+8\text{LiF}$ (вес %) на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН на пластины из стали Э76 размерами $100\times 50\times 10$ мм. Структурные исследования проводили с использованием светового микроскопа Carl Zeiss AxioObserver Z1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа INCA. Измерения микротвердости осуществляли на микротвердомере Wolpert Group 402 MVD.

В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси на заготовки из стали Э76 формируется градиентная структура, что обусловлено различной скоростью нагрева и отвода тепла вглубь металла. Дефектов типа трещин, отслоений, раковин в поверхностных слоях не зафиксировано. Можно выделить четыре зоны: поверхностный слой (непосредственно наплавленное покрытие), переходный слой, зона термического влияния и основного материала. Между наплавленным слоем и стальной основой наблюдается четкая граница. Структура наплавленного слоя дендритная с большим количеством карбидов по границам дендритов. Средний размер включений составляет 2 мкм. Химический состав наплавленного слоя соответствует составу Fe-0.1C-15Cr-8Ni. В зоне видимой границы раздела наблюдается зона с промежуточным содержанием легирующих элементов, в которой при охлаждении происходит формирование мартенситной структуры. Для зоны сплавления характерно отсутствие совпадения границ основного и наплавленного материала. Наблюдается проникновение расплавленного металла наплавленного слоя вглубь основного металла по границам бывшего аустенитного зерна. Глубина проникновения составляет до 100 мкм. Химический состав областей, проникающих в материал стали Э76, характеризуется наличием 3 вес. % хрома и 1.5 вес. % никеля. Зона термического влияния составляет в среднем 2 – 2,5 мм. Зона термического влияния характеризуется пластинчатым перлитным строением с незначительным увеличением размеров колоний, по сравнению с исходным состоянием.

ДюрOMETрические исследования показали, что микротвердость в переходной зоне достигает 615 HV, что связано с формированием мартенситной структуры. При этом

микротвердость наплавленного слоя и зоны термического влияния в стали Э76 составляет 330 и 290 HV, соответственно.

Таким образом, вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковой смеси $42\text{Cr}+24\text{Ni}+2\text{Ti}$ с флюсом $24\text{CaF}_2+8\text{LiF}$ (вес %) на заготовки из стали Э76 позволяет сформировать качественные поверхностные слои необходимого состава для дальнейшей сварки данных заготовок с заготовками из стали 110Г13Л.

"Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013)".

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛА ПРИ АДДИТИВНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В.Г. БУРОВ, Т.С. ОГНЕВА, О.Н. ДУЛЬБЕЕВА

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск
E-mail: v.burov@corp.nstu.ru

Послойный синтез металлических изделий с использованием наплавочных технологий обеспечивает возможность формировать геометрию наружных и внутренних поверхностей высокой степени сложности, которая не может быть обеспечена другими методами изготовления, а также принципиальную возможность создавать изделия с изменяющимся химическим составом и направленной анизотропией свойств. Целью проведенных исследований было исследование структуры и механических свойств материала после изготовления изделий аддитивным лазерным селективным спеканием порошкового сплава *Ti6Al4V ELI*.

Изготовление изделий и образцов для прочностных испытаний проводилось в среде аргона высокой чистоты на 3D принтере *EOS M290* фирмы *GmbH Electro Optical System*, оснащенном иттербиевым оптоволоконным лазером мощностью 400 Вт с длиной волны 1,065 мкм. Скорость перемещения лазерного луча относительно порошкового слоя составляла до $7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при шаге сканирования 0,1 мм, порошок сплава *Ti6Al4V ELI* с имел гауссово распределение размера частиц сферической формы в пределах от 20 до 46 мкм. Сплошные образцы для проведения прочностных испытаний спекались в среде аргона высокой чистоты непосредственно на плите из сплава ВТ6, после чего вместе с ней подвергались термической обработке в вакууме при температуре 750...800 °С в течение 3 часов. Образцы отделялись от стола электроискровой проволочной резкой на расстоянии 0,5 мм от поверхности стола, после чего подвергались абразивной обработке со всех сторон. Прочность спеченных образцов при растяжении составила $\sigma_b = 1182 \pm 15 \text{ МПа}$ при относительном сужении $\psi = 13,1 \dots 20,3 \%$ и удлинении - $\delta = 8,9 \dots 13,3 \%$, что соответствует пределу прочности деформированного и отожженного сплава (~1100 МПа) и значительно выше предела прочности сплава, полученного литьем (~900 МПа). В тоже время, испытания полученных образцов стандартных размеров, проведенные на маятниковом копре *Metro Com 06103300*, показали ударную вязкость $KCV = 32 \dots 36 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$, в то время как минимальные значения ударной вязкости для деформируемых сплавов аналогичного состава составляют $KCV \sim 50\text{-}100 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$.

Высокая прочность материала при растяжении свидетельствует об оптимальности подобранных режимов послойной наплавки, а снижение прочности материала при динамических нагрузках связано с наличием в материале структурных дефектов в виде пор размером до 200 мкм. На металлографических снимках отожженной структуры отчетливо выделяются границы исходных β -зерен. В продольном и поперечном направлении морфология и размеры первичных зерен β -фазы различны, что связано с их эпитаксиальным ростом в пределах двух или более слоев при послойной наплавке. В сечении параллельном столу материал характеризуется равноосным строением.

Выводы:

- дефектность структуры в виде пор объясняется захватом инертного газа, адсорбированного на поверхности частиц;
- термическая обработка в вакууме является необходимой операцией, позволяющей снизить остаточные напряжения, возникшие при первичной кристаллизации верхнего наплавленного слоя и позволяет удалить поры, расположенные вблизи от поверхности;
- исключение образования дефектов структуры в виде пор может быть достигнуто дополнительной термомеханической обработкой или наплавкой слоев в вакууме;
- наиболее перспективным при послойном формировании изделий наплавкой в вакууме представляется использование вместо лазерного электронного луча.

¹ "Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013)".

ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

Е.Г. БУШУЕВА, А.Ф. САПИНА, В.А. БАТАЕВ

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: dusias@mail.ru

В нефтегазодобывающей и горной промышленности широко применяется хромоникелевая сталь (например, 12X18H9T) для изготовления элементов шламовых насосов, телеметрических систем, буровых колон. В процессе эксплуатации эти элементы подвергаются интенсивному изнашиванию в условиях воздействия абразивных частиц со стороны горной породы. Следовательно, требуется частая замена изношенных деталей и остановка работы оборудования и шахты в целом. Это, в свою очередь, приводит к значительным экономическим потерям.

В связи с этим актуальной становится задача повысить износостойкость поверхностных слоёв хромоникелевой аустенитной стали.

Одним из способов повышения механических свойств покрытия является упрочнение путём введения в наплавленный материал тугоплавкой дисперсной фазы

В работе исследованы структура, микротвердость и триботехнические свойства покрытий, сформированных на поверхности аустенитной хромоникелевой стали 12X18H9T. В качестве метода поверхностного упрочнения использовали вневакуумную электронно-лучевую наплавку порошковых смесей содержащих карбид титана.

Обработка осуществлялась путем поверхностного оплавления порошковых смесей равномерно нанесенных на основной материал.

В качестве наплавляемой порошковой смеси использовали: TiC (40 %), Fe (10 %), MgF₂ (50 %). Карбид титана использовали как упрочняющий компонент, Порошок Fe для смачивания модифицирующего материала, равномерного распределения химических элементов в слое и отвода тепла. В качестве флюса был выбран MgF₂.

Наплавка порошковых смесей проводилась в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ) СО РАН на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6. Обработка осуществлялась в сканирующем режиме по следующим параметрам: энергия электронного пучка – 1,4 МэВ; максимальная мощность 100 кВт; частота сканирования 5 Гц; скорость перемещения образца относительно пучка – 10 мм/с; ток пучка 22-24 мА. В процессе обработки порошковая смесь, состоящая из карбида титана, железа и флюса, равномерно распределялась по поверхности основного материала. Масса насыпки на 1 см² составила 0,45 г.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Axio Observer Z1m (Carl Zeiss) с увеличением до 1000 крат.

Для определения микротвердости образцов по Виккерсу использовался микротвердомер WolpertGroup 402MVD. Измерения микротвердости осуществлялись по ГОСТ 9450-76.

Оценка износостойкости наплавленных покрытий проводилась в условиях трения о закрепленные частицы абразива по ГОСТ 17367-71.

Результаты металлографических исследований свидетельствуют о формировании покрытий толщиной около 1,5 мм. Структура покрытия предположительно представляет вязкую матрицу аустенита с достаточно равномерным распределением карбида титана в объёме покрытия.

Частицы TiC представляют собой включения различной округлой формы, находящиеся в твердом растворе разрозненно, либо с образованием небольших конгломератов. Такое равномерное распределение и окружение карбидной частицы материалом матрицы обеспечивает их удержание в матрице при ударном абразивном воздействии. У поверхности наблюдается более компактное расположение вводимых частиц.

Микротвердость сформированных покрытий составляет соответственно 6,2 ГПа ($I = 22$ мА), 9,6 ГПа ($I = 23$ мА), 8,4 ГПа ($I = 24$ мА), что существенно выше значений микротвердости материала основы $\approx 1,96$ ГПа.

Износостойкость всех образцов с наплавленным покрытием превышает износостойкость материала основы. Образцы, наплавленные при значениях тока пучка $I=23$ мА и $I=24$ мА, показали наиболее высокое значение износостойкости $\epsilon \approx 1,82$. Это объясняется более глубоким проплавлением материала основы с увеличением тока. Равномерное распределение частиц карбида титана по объёму покрытия обеспечивает высокое сопротивление абразивному изнашиванию.

Таким образом, вневакуумная электронно-лучевая наплавка частиц карбида титана на хромоникелевую аустенитную сталь позволяет получить бездефектные покрытия толщиной до 1,5 мм, с высокой адгезией, что существенно повышает механические характеристики исходного материала, такие как твердость и износостойкость.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА РОСТ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СЛОЯ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

И.Е. ВИТОШКИН¹, А.А. НИКУЛИНА¹, А.Г. МАЛИКОВ²

¹Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, г. Новосибирск

E-mail: igor.vitoshkin.97@mail.ru

Целью данной работы является изучение влияния режима лазерной сварки на свойства получаемого соединения между пластинами из титанового сплава ВТ-5 и алюминиевого сплава В-1461. Особенностью сплава В-1461 является его легирование литием, создающим в структуре сплава упрочняющие фазы. Данный сплав широко применяется в авиации.

Основной проблемой при сварке титановых и алюминиевых сплавов является образование интерметаллидных соединений, наличие которых приводит к потере прочности и пластичности в зоне сварного соединения.

Процесс сварки осуществлялся в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН на автоматизированном лазерном технологическом комплексе “Сибирь-1”. При проведении экспериментов варьировалось смещение лазерного луча в сторону титановой пластины, которое составляло 0, 0,5 и 1 мм. Мощность лазерного излучения составляла 1,15 кВт, скорость перемещения пучка - 1 м/мин., фокус располагался на 3 мм ниже поверхности.

В рамках работы была определена прочность полученных соединений на растяжение, проведены фрактографические и металлографические исследования, а также изучена микроструктура поперечного сечения сварного шва на растровом электронном микроскопе.

Механические испытания показали рост прочности с 103 МПа (при отсутствии смещения) до максимальной прочности 272 МПа (при смещении на 1 мм). Большинство соединений (3 из 4), полученных при отсутствии смещения лазерного луча, самопроизвольно разрушились через некоторое время после сварки. Соединения, полученные со смещением 0,5 мм, имели прочность в среднем 163 МПа (максимальная прочность 213 МПа). Средняя прочность при сварке со смещением луча на 1 мм составила 195 МПа (максимальная прочность 272 МПа). Разрушение происходило по сварному соединению.

Фрактографические исследования выявили рост доли вязкого разрушения при смещении лазерного луча: практически нулевая вязкость излома при сварке без смещения (рисунок 1, а), появление зон вязкого излома при смещении луча на 0,5 мм (рисунок 1, б) и их значительный прирост при смещении на 1 мм (рисунок 1, в).

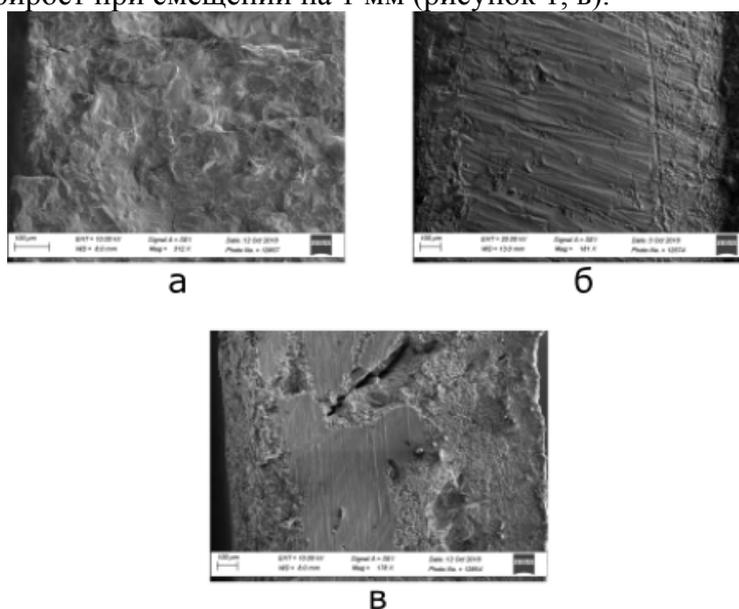


Рисунок 1 – Поверхности разрушения: а) сварка без смещения, б) – сварка со смещением 0,5 мм, в) – сварка со смещением 1 мм

Методом растровой электронной микроскопии было установлено положительное влияние смещения лазерного луча на толщину интерметаллидного слоя в структуре соединения: около 800 мкм при отсутствии смещения (рисунок 2, а); 2,3 мкм при смещении на 0,5 мм (рисунок 2, б) и 0,9 мкм при смещении лазерного луча на 1 мм (рисунок 2, в).

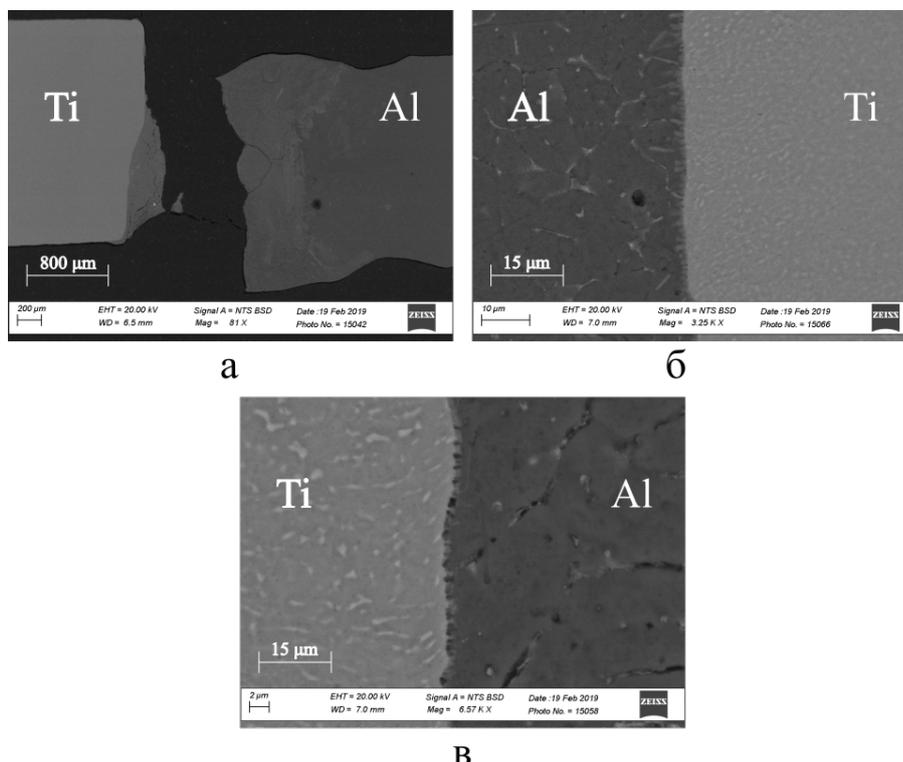


Рисунок 2 – Микроструктура поперечного сечения соединений, полученных без смещения луча (а), со смещением на 0,5 мм (б) и со смещением 1 мм (в)

Основываясь на результатах исследований можно сделать следующие выводы:

1. Смещение лазерного луча при сварке титанового и алюминиевого сплавов марок ВТ-5 и В-1461 приводит к замедлению роста интерметаллидной прослойки между свариваемыми материалами.
2. Уменьшение интерметаллидного слоя способствует повышению механических характеристик – вязкости разрушения и прочности на растяжение.
3. Смещением лазерного луча удалось получить сварное соединение с прочностью 272 МПа.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. ВЛАДИМИРОВ, П.А. ТРАВКИН

ООО «Завод технологических источников», г. Санкт-Петербург

E-mail: labeltech@mail.ru

Для комплексной оценки производительности сварочного оборудования целесообразно применение показателя (Overall Equipment Efficiency — OEE), основанного на измерении и обработке конкретных производственных показателей [1]. Количественно показатель определяется по формуле: **OEE = Доступность * Скорость * Качество**, где

Доступность определяется как отношение между фактическим временем сварки и запланированным на неё временем и учитывает время на остановки и простои.

Скорость есть отношение между реальной скоростью сварки к максимально возможной.

Качество вычисляется как отношение количества выполненных сварных соединений, исключая имеющих несоответствие установленным стандартам (брак), к общему выполненному количеству соединений.

Для сварочного оборудования показатель «Доступность» определяется: нагрузочной способностью (ПН) сварочного оборудования и уровнем его защищенности (ИП), надёжностью и ремонтпригодностью оборудования, универсальностью и быстротой наладки, простотой настройки, т.е. теми свойствами оборудования, которые снижают его простои.

Показатель «Скорость» зависит от наличия высокопроизводительных режимов сварки, возможности удалённой работы от источника и применения механизированной и автоматизированной сварки.

Высокое значение показателя «Качество» обеспечивается наличием специализированных режимов сварки, стабильностью и эластичностью сварочной дуги, обеспечением требуемого тепловложения, автоматической регистрацией и анализом процессов сварки.

Для повышения производительности сварочного оборудования ООО «Завод технологических источников» разработал и реализовал в серийном производстве систему унифицированного сварочного оборудования [2], которая основывается на принципах:

1. Разделения силовой и цифровой подсистем сварочного оборудования,
2. Модульной структуры силовой подсистемы источников сварочного тока,
3. Полного цифрового управления сварочным оборудованием.

Перечисленные основы построения системы сварочного оборудования позволяют все источники сварочного тока для ручной дуговой, механизированной и автоматизированной сварки, независимо от величины номинального тока и применяемого электрода, собирать из одинаковых силовых модулей. Унифицированный силовой модуль – это высокочастотный инвертор, который преобразует энергию 3-х фазной промышленной сети электропитания в сварочный ток и имеет вес 6.7 кг и размеры 20*20*20см. Параллельная работа и настройка модулей на определённую вольт-амперную характеристику (ВАХ) реализуется центральным процессором источника посредством специального протокола обмена данными в сварочном источнике.

Полное цифровое управление реализуется наличием цифрового процессора в контуре управления дугой, цифровым интерфейсом со сварщиком и другими производственными устройствами, а также системой программирования сварочных процессов, основой которой является язык описания алгоритма выполнения сварочным аппаратом сварного соединения. На языке описываются этапы выполнения сварного соединения и условия перехода от одного этапа к следующему. В качестве условий могут служить значения измеренного тока и напряжения сварочной цепи, положения органов управления на пульте управления и горелке, и другие данные.

Каждому этапу соответствует определённая ВАХ источника, предварительно записанная в память сварочного аппарата. Посредством системы программирования

разработаны сотни сварочных процессов для различных электродов и способов сварки. На рис. 1, в качестве примера, представлены циклограммы сварки с естественными короткими замыканиями (КЗ). На представленных графиках видно, что наступление КЗ, связанное с резким падением напряжения, не вызывает значительного изменения тока. Это сделано для того, чтобы капля расплавленного электродного металла вошла в «плотный контакт» со сварочной ванной. Если этого не сделать, то усиление тока в начальный момент КЗ часто приводит к взрыву и интенсивному разбрызгиванию.

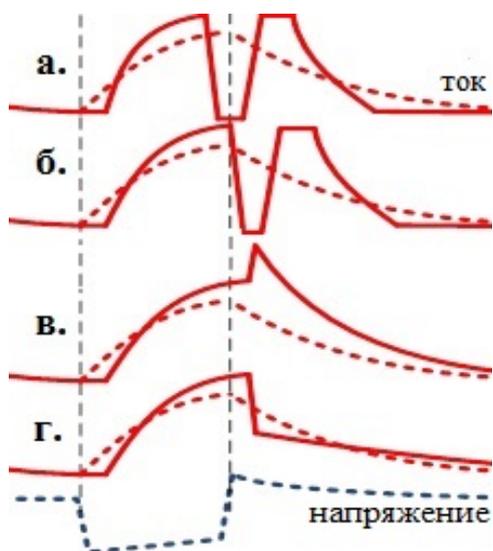


Рисунок 1 - Циклограммы сварки с КЗ

Циклограмма 1.а отображает сварку с КЗ, при котором резкое снижение тока до 30-60А производится до завершения КЗ и при низком напряжении (6-8В). После снижения тока происходит стекание электродного материала в сварочную ванну в основном под действием сил поверхностного натяжения. Данный метод сварки с КЗ удобен для сварки корневых слоёв с формированием обратного валика во всех пространственных положениях без подкладок. На рис.1.б. показана циклограмма в которой ток сварки резко снижается при завершении КЗ. При этом снижается энергия дуги. Данный режим предназначен для сварки тонких деталей с минимальным тепловложением. В другом режиме (рис.1.в.) ток на короткий интервал возрастает после завершения КЗ, инициируя стабильную, энергичную дугу. Применение этого способа отличается более высокой производительностью и устойчивостью дуги. Для сварки с глубоким проплавлением разработан способ сварки, циклограмма сварки которого представлена на рис.1.г. Суть процесса состоит в сбросе тока после КЗ и

поддержании пониженного напряжения за счет стабилизации тока. При этом дуга горит погружённой в сварочную ванну, обеспечивая глубокий провар.

Применение системы программирования позволило разработать также и различные процессы импульсной сварки без коротких замыканий, а также комбинированные процессы, использующие как импульсные режимы, так и сварку с КЗ. Благодаря короткому сроку разработки стало возможным для различных электродных материалов (медно-никелевых, ванадиевых, молибденовых и др.) реализация специализированных сварочных и наплавочных процессов.

Цифровое управление обеспечивает не только сварочный процесс, но и его регистрацию и анализ на их соответствие заданию на сварку. Важно, что это дисциплинирует сварщиков и является незаменимым инструментом в поддержании качества сварки на предприятии.

Эксплуатация тысяч сварочных источников на сотнях предприятий в России и за рубежом показала, что разработанная система сварочного оборудования на основе модульной структуры и полного цифрового управления имеет более высокий коэффициент производительности за счет применения эффективных и специализированных способов сварки, глубокой унификации оборудования, обладающего высоким КПД, нагрузочной способностью и защитными свойствами.

Список литературы

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/OEE>
2. <https://www.evospark.ru>

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 09Г2С, ДОБАВЛЕНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКА С НАНОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ КАРБОНИТРИДА ТИТАНА

Н.К. ГАЛЬЧЕНКО¹, В.П. САМАРЦЕВ¹, К.А. КОЛЕСНИКОВА¹, И.В. ВЛАСОВ¹, С.В. ПАНИН^{1,2}, А.В. ЯКОВЛЕВ²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: viv@ispms.tsc.ru

Сварка является наиболее эффективным и широко распространенным способом создания неразъемных соединений при изготовлении изделий и конструкций [1]. Соединенные таким образом детали характеризуются высокой прочностью, а сам процесс сварки не требует больших экономических затрат. Однако, сварной шов в конструкции является заметной макронеоднородностью [2], сочетая в себе зону высокой хрупкости (материал шва) и зоны термического влияния (ЗТВ) рядом со швом, характеризующиеся более низкой прочностью. В наибольшей степени снижение механических свойств сварного шва по сравнению с исходным материалом наблюдается в условиях приложения ударных нагрузок [3], а также отрицательных температур [4].

Для упрочнения сварного соединения в электроды добавляют легирующие элементы, существенно модифицирующие материал сформированного шва [5]. В наибольшей степени таким целям отвечают никель и молибден, которые способствуют как стабилизации аустенита (в первом случае), так и формированию карбидов молибдена при вторичной кристаллизации расплава, которые могут концентрироваться на границе $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, способствуя измельчению образующихся зерен феррита. Однако, повышение показателей прочности и вязкости (разрушения) можно также достичь за счет синергетического действия нескольких структурно-зависимых факторов.

Еще одним перспективным способом повышения механических свойств является добавление в расплавочную ванну наночастиц карбонитрида титана. Это позволяет снизить размер первичного зерна аустенита и сдвинуть область превращения в зону более низких температур за счет появления дополнительных центров кристаллизации, либо мест переохлаждения.

Целью настоящего исследования было изучить структуру и механические свойства наплавленных слоев и сварных соединений, изготовленных с помощью электродов, в обмазку которых добавлены присадки никеля, молибдена, а также наночастицы карбонитрида титана. Ожидается, что подобная модификация приведет к повышению уровня механических свойств сварных соединений и защитных наплавленных слоев из низкоуглеродистой вязкой стали, эксплуатируемой, в том числе, в условиях низких температур. В качестве материала исследования была использована свариваемая конструкционная низколегированная сталь 09Г2С, применяемая для изготовления горячедеформированных труб.

Электроды для ручной дуговой сварки/наплавки были изготовлены из проволоки марки СВ-08 с покрытиями, полученными на основе шихты электродов ОЗС-12 (ГОСТ-2246-60) и МР-3 (ГОСТ 9466-75, ГОСТ 9467-75).

В качестве дополнительного компонента в электродную обмазку на стадии производства электродов вводили СВС - композиционный порошок системы (Fe-TiC_{0,5}N_{0,5}) из расчета получения 0,15 мас.%TiC_{0,5}N_{0,5} (в покрытии электрода МР-3) и 0,25 мас.%TiC_{0,5}N_{0,5} (в покрытиях электрода ОЗС-12). Содержание TiC_{0,5}N_{0,5} было выбрано на основании предварительных испытаний на ударную вязкость.

Показано, что введение в сварочную ванну 0.25 мас. % карбонитрида титана в покрытие электрода ОЗС-12 привело к уменьшению среднего размера зерна в структуре сварного шва и повышению ударной вязкости при температурах -40° С и -70° С до 24 %. Повышение ударной вязкости при отрицательных температурах в первую очередь связано с

более эффективным сдерживанием развития магистральной трещины (стадия II ударного разрушения).

Комплексное легирование никелем (3 мас. %), молибденом (0,6 мас. %) и карбонитридами титана (0,25 мас. %) оказалось наиболее эффективным с точки зрения повышения дисперсности структурных составляющих и микротвердости сварных швов.

В результате наплавки электродом МР-3, содержащим 0,15 мас. % TiC_xN_y , формируемое покрытие претерпевает определенные изменения, которые выражаются в повышении однородности, существенном измельчении структуры и значительном повышении ударной вязкости с 42 Дж/см² до 104,5 Дж/см². При этом у покрытий, наплавленных экспериментальным электродом МР-3, содержащим 0,15 мас. % TiCN, в процессе кристаллизации были сформированы более качественные, плотные по всему сечению слоя структуры с плавной переходной зоной. Очевидно, что присутствующие в составе электродного покрытия частицы карбонитрида титана оказали заметное влияние на развитие процессов кристаллизации в ванне расплава, выступая в качестве дополнительных иннокуляторов, и способствуя ускоренному и более равномерному затвердеванию наплавленного покрытия.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-38-00679 и 18-08-00516.

Список литературы

1. Cheng Z., Huang J.H., Ye Z., Liu H., Yang J., Chen S.H., Zhao X.K. Interfacial microstructure evolution and mechanical properties of TC4 alloy/304 stainless steel joints with different joining modes // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Т. 36. – С. 115-125.
2. Yu P., Thompson K.J., Mccarthy J., Kou S. Microstructure evolution and solidification cracking in austenitic stainless steel welds // Welding Journal. – 2018. – Т. 97. – № 11. – С. 301S-314S.
3. Magudeeswaran G., Balasubramanian V., Madhusudhan Reddy G., Balasubramanian T.S. Effect of welding processes and consumables on tensile and impact properties of high strength quenched and tempered steel joints // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2008. – Т. 15. – № 6. – С. 87-94.
4. Lazic V., Aleksandrovic S., Arsic D., Sedmak A., Ilic A., Djordjevic M., Ivanovic L. The influence of temperature on mechanical properties of the base material (BM) and welded joint (WJ) made of steel S690QL // Metabk. – 2016. – Т. 55. – № 2. – С. 213-216.
5. Kolooshani S.H., Atrian A. Mohseni E. The effect of alloying elements on fracture resistance of E7010-P1 cellulosic welding electrodes // Materials Research Express. – 2018. – Т. 5. – № 11. – С. 116511.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ

А.И. ГЕРАСИМОВ, Е.В. ДАНЗАНОВА, Г.В. БОТВИН, А.С. ШИШИГИНА

Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск
E-mail: Dhv4071@mail.ru

Для соединения труб из полимерных материалов в основном используется сварка нагретым инструментом. При этом нагрев свариваемых поверхностей осуществляется путем их физического контакта с нагретым инструментом. В данной работе рассмотрены два вида сварки нагретым инструментом: встык полиэтиленовых труб и в раструб полипропиленовых труб. В результате воздействия термомодеформационного цикла сварки в материале сварного соединения формируется различная структура. Структура, в свою очередь оказывает влияние на прочность сварного соединения в целом. Более детальное исследование сформированной структуры поможет установить зависимость прочности сварных соединений от размеров и особенностей структурных образований. Для контроля качества сварных соединений используются различные неразрушающие и разрушающие методы испытаний. Анализ методов контроля качества сварных соединений полимерных труб показал, что существующие в действующих нормативных документах методики испытаний недостаточно информативны и количественной оценки прочности не дают [1, 2].

Целью данной работы является исследование структуры и прочности материала сварных соединений, полученных при различных режимах сварки. Объектами исследования служили сварные соединения полиэтиленовых и полипропиленовых труб. Сварка полиэтиленовых и полипропиленовых труб проводилась при различных температурах окружающего воздуха, в том числе и при низких (до минус 50 °С). Существует допустимый диапазон температур производства сварочных работ полимерных труб. Так, согласно действующим нормативным документам, полиэтиленовые трубы для газопроводов допускается сваривать при температурах от минус 15 °С до плюс 45 °С, а полипропиленовые трубы только при положительных температурах. При более низких значениях рекомендуется проводить сварочные работы в отапливаемых укрытиях. В ИПНГ СО РАН предложены пути решения данной проблемы, то есть, разработаны технологии сварки нагретым инструментом встык полиэтиленовых труб и нагретым инструментом в раструб полипропиленовых труб, позволяющие проводить сварочные работы при температурах окружающего воздуха ниже нормативных на открытом воздухе без строительства отапливаемых укрытий [3, 4].

Структура сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб проводилась с помощью универсального оптического микроскопа Альтами ПОЛАР 312 (Россия). Поверхность образцов для микроскопических исследований подготавливалась методом травления в парах кипящего толуола в течение 3 мин. Поверхности травления в области линии сплавления изучались при $\times 1000$ увеличении.

Надмолекулярная структура материала образцов сварных соединений, сваренных с использованием разработанной в ИПНГ СО РАН технологии сварки при низких температурах, наиболее идентична структуре на исследуемом участке сварного шва, выполненного с использованием стандартного режима сварки. При этом размеры сферолитов варьируются в пределах 5-15 мкм. Также можно отметить, что сферолиты немного деформированы. Вероятно, это вызвано усадкой материала шва, связанной с тем, что концы свариваемых труб жестко фиксированы. Структура материала сварного соединения, полученного при минус 30 °С с нарушением технологии, характеризуется наличием кристаллических образований размерами 3-5 мкм. Мелкокристаллическая структура возникает при высокой скорости охлаждения сварного соединения.

Исследования прочностных характеристик сварных стыковых соединений показали, что прочность швов, изготовленных при низких температурах разработанной технологией, выше тех же значений прочности сварных соединений, произведенных в допустимом для сварки интервале температур. Показатели прочности сварных соединений, полученных с нарушением технологии ниже тех же показателей сварных соединений, выполненных при

низких температурах ОВ по разработанной технологии и сварных соединений сваренных в допустимом интервале температур. Однако, следует обратить внимание на то, что при положительных температурах выше 30 °С наблюдается некоторое понижение прочности. Вероятно, это связано с тем, что в этом случае остывание сварного соединения уже идет слишком медленно и кристаллические образования в структуре материала вырастают до 50-100 мкм. Таким образом, формирование в структуре материала слишком мелких сферолитов (до 5 мкм), а также слишком крупных (до 100 мкм) негативно влияет на прочность сварного соединения полимерных труб.

Сварка в раструб полипропиленовых труб проводилась при различных режимах: при положительных температурах стандартной технологией, при отрицательных разработанной в ИПНГ СО РАН технологией и при отрицательных стандартной сваркой, т.е. с нарушением. Структура материала полученных сварных соединений исследовалась на электронном растровом микроскопе JEOL JSM-7800F. Поверхность образцов для исследований подготавливалась также травлением в парах кипящего толуола.

Вид и размеры надмолекулярных образований в структуре материала сварных соединений, произведенного при минус 30 °С разработанной технологией наиболее схожа со структурой сварного соединения, полученного при комнатной температуре стандартной сваркой. Структура сферолитная, размеры сферолитов варьируются от 3 до 8 мкм. В процессе сварки при низких температурах окружающего воздуха нарушением технологии скорость охлаждения, естественно высокая, в связи с этим структура на исследуемом участке характеризуется с несформированными мелкими сферолитами размерами с 2-3 мкм и наличием застывшей аморфной части. То есть можно сделать вывод, что разработанная технология сварки, которая обеспечивает такой же термический процесс, который способствует формированию структуры в материале сварного соединения такой же, как при допустимом интервале температур производства сварки.

Исследования прочности раструбных сварных соединений проводились испытаниями растяжением на сдвиг по оригинальной методике, позволяющей количественно определить прочность по месту сплавления свариваемых деталей [5]. Механическими испытаниями растяжением на сдвиг видно, что разрушающее напряжение сварных раструбных соединений, произведенных при температуре минус 35 °С разработанной технологией не уступает прочности сварных соединений, полученных стандартной сваркой при комнатной температуре.

Исследованиями структуры и прочностных свойств материала сварных соединений показано, что разработанные технологии сварки нагретым инструментом встык полиэтиленовых труб и в раструб полипропиленовых труб обеспечивают формирование такой же структуры материала сварных соединений как при сварке в регламентированном интервале температур окружающего воздуха.

Список литературы

1. Данзанова Е.В. Вопросы контроля качества сварных соединений полиэтиленовых труб для газопроводов // Нефтегазовое дело, 2009 [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Danzanova/Danzanova_1.pdf
2. Герасимов А.И., Данзанова Е.В., Ботвин Г.В. Испытания сварных соединений полипропиленовых труб // Вестник ВСГУТУ. – 2017. – № 3 (66). – С. 38-42.
3. Starostin N.P., Vasil'eva M.A., Danzanova E.V., Ammosova O.A. Butt welding of polyethylene pipes at low temperatures // *Welding International*. – 2013. – Vol. 27. – Pp. 318-320.
4. Старостин Н.П., Герасимов А.И., Ботвин Г.В., Данзанова Е.В. Сварка полипропиленовых труб при отрицательных температурах // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2017. – № 4 (55). – С. 7-18.
5. Gerasimov A. I., Danzanova E. V., Botvin G. V. Research methods of strength of weld seam of polymer pipes // *Proceedings of the 12th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2018): AIP Conference Proceedings 2053, 030018 (2018)*; DOI: 10.1063/1.5084379 <https://doi.org/10.1063/1.5084379>.

ВЛИЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЛЮСОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ АЛЮМИНИЯ

Е.А. ГЕРАСИМОВ, П.В. ЖИЛИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород
E-mail: zenyger@rambler.ru

Пайка алюминия на сегодняшний день является наиболее предпочтительной при производстве теплообменных устройств. Алюминий отлично сопротивляется коррозии, легко формуется, имеет высокую теплопроводность и низкий удельный вес. Все эти свойства делают его практически идеальным материалом для производства различных видов радиаторов, в том числе для автомобильной промышленности, мировое производство которых составляет миллионы штук в год. В дальнейшем роль алюминия в производствах разного рода будет только увеличиваться, так как его применение значительно снижает себестоимость продукции, в отличие от меди. Так же применение алюминия позволяет снизить общий вес конструкции, что очень важно в авиационной промышленности.

Алюминий и его сплавы относятся к труднопаяемым металлам, так как окись алюминия является весьма стойким химическим соединением. При выполнении процесса пайки алюминия необходимо обеспечить разрушение оксидной пленки алюминия и предотвратить ее дальнейшее образование во время пайки. Для этой цели наиболее широко применяются паяльные флюсы.

В современной промышленности доминирующее положение занимает высокотемпературная пайка ($T > 450^{\circ}\text{C}$) припоями на основе алюминия с использованием соответствующих флюсов. Принципиально возможна пайка алюминия и при более низкой температуре, однако для такой пайки не созданы в промышленности эффективные системы припой-флюс обеспечивающие, высокую коррозионную стойкость и прочность паяных швов.

Для высокотемпературной пайки алюминия в настоящее время в основном используются два типа флюсов: системы на основе эвтектики KF-AlF_3 и на основе эвтектик, содержащих хлориды лития, калия и натрия.

В настоящей работе изучено влияние добавок соединений лития (LiNO_3 , LiCl , LiBr , LiF) в эвтектике KF-AlF_3 на растекаемость припоя марки АЛ2 по сплаву АМц, а также на прочность и микроструктуру паяных соединений.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ ТРЕНИЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.В. ГЛУХОВСКОЙ, Р.С. МИХЕЕВ, Н.В. КОБЕРНИК

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва
E-mail: glus81095@gmail.com

Потребность в новых материалах машин и механизмов, обладающих высоким уровнем функциональных характеристик, привлекает все большее внимание к разработке дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов (КМ). В тоже время для обеспечения работоспособности в довольно сложных условиях эксплуатации, сочетающих воздействия различной физико-химической природы, во многих случаях возникает необходимость создания функционально-градиентных слоистых композиций (ФГСК) триботехнического назначения на базе конструкционных сталей с рабочими слоями из КМ.

К настоящему времени номенклатура производственных процессов формирования ФГСК включает твердофазные (например, прокатку пакетов из материала матрицы и КМ, сварку взрывом, термомеханическую обработку поверхностного слоя КМ), жидкофазные способы (например, инфильтрацию специально собранных порошковых каркасов переменного состава, центробежное литье, наплавку, модифицирующую обработку оплавлением), а также методы нанесения покрытий из газовой фазы. Однако, большинство из них являются относительно дорогими и трудоемкими. Одним из наиболее предпочтительных подходов для решения этой задачи является применение технологии фрикционной наплавки или наплавки трением.

Процесс фрикционной наплавки был впервые предложен в 1941 г. Клопштоком и Ниландсом с целью упрочнения и повышения износостойкости рабочих частей режущего инструмента. Фрикционная наплавка представляет собой процесс осаждения металла в твердо-жидком высокопластичном состоянии при наличии относительного движения между соединяемыми заготовками, находящимися в физическом контакте из-за приложенной осевой силы для создания термомеханических условий нанесения покрытий. Многочисленные исследования показали, что процесс фрикционной наплавки является энергоэффективным и чистым для создания ФГСК в сравнении с лазерной или дуговой наплавкой. Применение фрикционной наплавки исключает плавление соединяемых материалов, поскольку температура нагрева стержня из КМ значительно ниже, чем при традиционных способах нанесения покрытий, и не превышает температуру ликвидуса. Поэтому процесс наплавки трением характеризуется узкой зоной термического влияния, ограниченной диффузией по границе раздела между материалом подложки и матрицей КМ, а также отсутствием дефектов в виде пор, что особенно важно для ФГСК. Кроме того, значимыми особенностями процесса фрикционной наплавки наряду с экономичностью и обеспечением стабильности качества соединения наплавленного слоя с подложкой, являются стабильность химического состава и сохранение заданных функциональных свойств в наплавленном слое.

Таким образом, процесс фрикционной наплавки, позволяющий за счет создания высоких контактных напряжений и ограниченного теплового воздействия обеспечивать высокий уровень адгезионной прочности между подложкой и наплавленным покрытием из КМ, является наиболее перспективным для создания функционально-градиентных слоистых композиций триботехнического назначения на базе конструкционных сталей с рабочими слоями из дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Н.И. ГОЛИКОВ¹, Е.М. МАКСИМОВА¹, Ю.Н. САРАЕВ²

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
E-mail: nikiforova_em@mail.ru

В регионах холодного климата среднегодовые температуры окружающего воздуха составляют около минус 10°С и ниже, а период отрицательных температур длится более 210 суток, поэтому значительный объем сварочных работ во время строительства, монтажа и ремонта конструкций производится в условиях отрицательных температур. Сварка в условиях низких климатических температур имеет свои особенности, связанные с увеличением скорости охлаждения сварных соединений [1]. С ростом скорости охлаждения увеличивается вероятность образования закалочных структур, что может привести к хрупким разрушениям сварных соединений.

Металл околошовной зоны характеризуется микроструктурной неоднородностью из-за градиента температурных полей. Наиболее проблематичной, с точки зрения обеспечения комплекса свойств, является участок перегрева, который образуется в результате теплового воздействия на основной металл [2]. Под влиянием высоких температур образуется нежелательное микроструктурное состояние, которое вызывает пониженную хладостойкость и охрупчивание металла вблизи линии сплавления [3].

Улучшение микроструктурного состояния зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений возможно применением импульсных технологий сварки [4, 5]. Импульсные технологии сварки имеют существенные преимущества [4-9] и позволяют: через программируемый ввод тепла в зону сварного соединения, управление процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла; создание в зонах сварных соединений технических систем мелкодисперсной структуры в металле шва и ЗТВ; существенно уменьшить степень остаточных деформаций сварных соединений.

Цель работы: исследование структуры зоны термического влияния сварных соединений низколегированной стали, выполненных в двух частотных режимах импульсно-дуговой сварки при отрицательных температурах окружающего воздуха.

Материалом для исследований выбран прокат листовой из низколегированной конструкционной стали 09Г2С, соответствующий ГОСТ 19281-2014, как наиболее широко применяемый в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях Севера и Арктики. Ручную дуговую сварку стыковых сварных соединений с V-образной разделкой кромок осуществляли в три прохода электродами марки ЛБ- 52TRU и УОНИ 13/Мороз диаметрами: 3,0 мм для формирования корневого слоя и 4,0 мм для формирования заполняющего и облицовочного слоев.

Для исследований подобраны следующие режимы сварки:

- импульсно-дуговая сварка с частотой модуляции сварочного тока 1,67 Гц (СМТ-1,67) при температуре выполнения сварки -45°С;
- импульсно-дуговая сварка с частотой модуляции сварочного тока 5 Гц (СМТ-5) при температуре выполнения сварки -45°С;
- сварка постоянным током (СПТ) при температуре выполнения сварки -45°С;
- сварка постоянным током (СПТ) при температуре выполнения сварки +20°С.

Металлографические исследования микроструктур сварных соединений в ЗТВ проводились на растровом электронном микроскопе высокого разрешения с катодом Шоттки JEOL JSM-7800F.

Анализ представленных микроструктур зон сварных соединений, полученных при сварке на постоянном токе и в импульсном режиме, показывает, что с увеличением частоты

модуляции сварочного тока происходит выравнивание тепловложения, и, при частоте 5 Гц, размеры ЗТВ становятся такими же, как и при сварке в режиме постоянного тока. По-видимому, это обусловлено теплоинерционностью распространения тепла от источника нагрева.

Исследование структур ЗТВ сварных соединений стали 09Г2С, полученных сваркой при разных температурах окружающей среды, показало, что на участках неполного расплавления и перегрева сварка при -45°C формирует более высокодисперсные по сравнению со сваркой при комнатной температуре феррито-карбидные смеси с некоторым содержанием закалочных бейнитных структур.

Список литературы

1. Ларионов В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. – Новосибирск: Наука, 1986. – 256 с.
2. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов / Л.А. Ефименко, О.Ю. Елагина, Е.М. Вышемирский, О.Е. Капустин, А.В. Мурадов, А.К. Прыгаев. – М.: Логос, 2011. — 304 с.
3. Di X., Tong M., Li Ch., Zhao Ch., Wang D. Microstructural evolution and its influence on toughness in simulated inter-critical heat affected zone of large thickness bainitic steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2019. – Т. 743. – С. 67-76.
4. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Григорьева А.А., Лебедев В.А., Максимов С.Ю., Голиков Н.И. Управление структурой и свойствами сварных соединений технических систем ответственного назначения методами адаптивной импульсно-дуговой сварки // *Вопросы материаловедения*. – 2015. – Т. 81. – С. 127-132.
5. Saraev Y.N., Bezborodov V.P., Gladkovskiy S.V., Golikov N.I. Improving the reliability of metallic structures in service in the conditions with low climatic temperatures by efficient application of advanced methods of modification of the zone of the welded joint // *Welding international*. – 2017. – Т. 31. – С. 631-636.
6. Zhernosekov A.M., Andreev V.V. Pulsed metal arc welding (Review) // *The Paton welding journal*. – 2007. – Т. 10. – С. 40-43.
7. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Князьков В.Л. Влияние режимов сварки углеродистых сталей на амплитуду полей внутренних напряжений и структурно-фазовое состояние в зоне термического влияния // *Деформация и разрушение материалов*. – 2017. – № 6. – С. 28-33.
8. Fedoseeva E. M., Olshanskaya T. V. Structure Formation and Nonmetallic Inclusions in Welded Joints when Welding Steel X65 by STT+API Technology // *Materials Science Forum*. – 2017. – Т. 893. – С. 229-233.
9. Kursun T. Cold metal transfer (CMT) welding technology // *The Online Journal of Science and Technology*. – 2018. – Т. 8. – С. 35-39.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПРИ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Н.И. ГОЛИКОВ, М.М. СИДОРОВ

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

E-mail: n.i.golikov@mail.ru

Анализ отказов техники и стальных конструкций, эксплуатирующихся в условиях Севера и Арктики, показывает, что зарождение трещин, приводящих к разрушению, происходит преимущественно в зонах сварных соединений [1, 2]. При этом, наиболее низкую сопротивляемость к хрупким разрушениям имеют сварные соединения, выполненные в условиях отрицательных температур окружающего воздуха [3]. Одним из факторов оказывающих существенное влияние на работоспособность сварных соединений являются остаточные сварочные напряжения (ОСН) [2, 4]. В настоящее время отсутствуют результаты экспериментальных исследований полей ОСН сварных соединений, выполненных сваркой при температурах ниже -40°C . Это создает некий вакуум для осознания качественного и количественного влияния остаточных напряжений на работоспособность сварного соединения, полученного сваркой при отрицательных температурах.

Проведены сравнительные экспериментальные исследования полей остаточных напряжений сварных соединений, выполненных при отрицательных и положительных температурах.

Исследовались ОСН стыковых сварных соединений пластин из стали 09Г2С, после их сварки при температуре окружающего воздуха -45°C и $+20^{\circ}\text{C}$. Односторонняя сварка пластин производилась в три слоя с применением электродов отечественного производства, таких как УОНИ 13/Мороз (ООО «Высокие технологии» г. Москва) и ЛБ-52TRU (ООО Научно-производственный центр «Сварочные материалы» г. Краснодар). Исследование ОСН проводили с помощью рентгеновского метода [5]. Остаточные напряжения измеряли в поперечном (σ_y) и продольном (σ_x) направлении относительно оси шва пластины в точках, расположенных на различном расстоянии от центра шва. При общем сравнении полей ОСН видно, что уровень остаточных напряжений сварных соединений с облицовочной стороны швов, полученных электродами УОНИ -13/Мороз выше чем ЛБ-52TRU. С корневой стороны наибольшие растягивающие ОСН обнаружены у сварного соединения пластины №4, выполненного сваркой электродами ЛБ-52TRU при $+20^{\circ}\text{C}$. В целом средний уровень обнаруженных растягивающих ОСН не высокий и находится в интервале 17...160 МПа, а максимальные остаточные напряжения достигают $-0,55\sigma_T$. Проведенные исследования полей ОСН показали, что уровень продольных растягивающих остаточных напряжений с облицовочных сторон сварных соединений при температуре выполнения сварки -45°C выше, чем при $+20^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

1. Ларионов, В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении / В.П. Ларионов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 256 с.
2. Голиков, Н.И. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера: монография / Н.И. Голиков, А.П. Аммосов. – Якутск: Изд-во СВФУ, 2012. – 232 с.
3. Ларионов, В.П. Влияние роста дефекта на прочность трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур / В.П. Ларионов, В.С. Апросимов, Ю.И. Егоров // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев, 1990. – С. 127-130.
4. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, CRC Press, 2005. – 343 p.

5. Барахтин, Б.К. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: справ. / Б.К. Барахтин, А.М. Немец; под ред. Б.К. Барахтина – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.

СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Н.И. ГОЛИКОВ¹, М.М. СИДОРОВ¹, Ю.Н. САРАЕВ²

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: n.i.golikov@mail.ru

Износ деталей землеройной техники, эксплуатируемой в горнодобывающей промышленности Севера, по своим масштабам имеет практически катастрофический характер. Анализ данных показывает, что только вследствие окончательного износа рабочих элементов горнодобывающей техники ежегодно на предприятиях промышленности теряется около десятка тысяч тонн металла [1, 2]. Интенсивность изнашивания коронок рыхлителей бульдозера, зубьев экскаватора и других деталей при разработке грунтов в условиях действия низких температур превышает в несколько раз значения, фиксируемые при положительных температурах [3]. В связи с этим, одной из важных задач является повышение срока службы режущих деталей землеройной техники, работающей при низких температурах.

Для решения данной проблемы наиболее универсальным, экономичным и широко применяемым в промышленности средством придания деталям техники специальных качеств, способствующих росту износостойкости, является наплавка [4]. Одним из перспективных направлений такого подхода является применение метода наплавки, основанных на реализации алгоритмов импульсного управления энергетическими параметрами процесса [5-7]. Однако для разработки эффективной технологии и метода нанесения наплавки необходимо комплексное исследование физико-механических свойств поверхностей упрочняемых материалов, их химического состава, структуры.

Цель работы — исследование механических свойств и износостойкости металла коронок на стойку бульдозера, а также наплавленных слоев, полученных различными технологическими режимами и сварочными материалами, для оценки их возможностей упрочнения.

В работе проведены комплексные исследования материалов однотипных коронок на стойку бульдозера Komatsu D275 разных мировых производителей — Китайской народной Республики (трех фирм-производителей), Австралии, Италии и России. Экспериментальные исследования включали: испытания на статическое растяжение, ударный изгиб, измерение твердости, спектральный анализ, ударно-абразивный износ. Проведенные исследования позволили оценить механические характеристики коронок на стойку бульдозера Komatsu D275 разных производителей.

Выявлено, что износостойкость наплавленного металла электрода марки Т590, полученного импульсно-дуговой наплавкой, больше на 31 % по сравнению с электродуговой наплавкой на постоянном токе. Установлено, что усредненный массовый износ материала коронок на стойку бульдозера в 2,3 раза выше, чем наплавленных слоев, полученных с применением различных сварочных материалов и технологий.

Список литературы

1. Слепцов О.И., Шульгинов В.Е., Михайлов В.Е. и др. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. – Новосибирск: Наука, 2012. – 183 с.
2. Густов Ю.И. Триботехника строительных машин и оборудования. – М.: МГСУ, 2011. – 192 с.
3. Мухаметшина Р.М. Трибологические отказы дорожно-строительных машин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № 1 (2). – С. 252-255.
4. Юдин В.М., Шиповалов А.Н., Храпков Г.А. Восстановление изношенных деталей наплавкой // Сварочное производство. – 2017. – № 7. – С. 35-37.

5. Сараев Ю.Н., Селиванов Ю.В. Оптимизация режимов и техники нанесения коррозионностойких покрытий электродуговой наплавкой в режиме импульсного изменения энергетических параметров технологического процесса // Новые промышленные технологии. – 2009. – № 4. – С. 15.
6. Сараев Ю.Н. Особенности разработки электро-технологических процессов сварки и наплавки на основе алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. – № 3. – С. 3-11.
7. Лебедев В.А., Сараев Ю.Н. Импульсные воздействия на процессы сварки и наплавки за счет систем механизированного и автоматического оборудования // Сварочное производство. –2015. – № 5. – С. 34-43.

МЕТОДИКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.И. ГОЛИКОВ¹, М.М. СИДОРОВ¹, Ю.Н. САРАЕВ², Р.П. ТИХОНОВ¹, Н.М. ЛИТВИНЦЕВ¹, С.В. СЕМЕНОВ¹

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: n.i.golikov@mail.ru

Сварка при низких температурах ведется при строительстве газо-, нефтепроводов, монтаже крупногабаритных металлоконструкций, ремонтно-восстановительных работах техники и объектов жизнеобеспечения. В большинстве случаев при выполнении вышеописанных работ невозможно или трудно обеспечить создание специальных условий для введения сварки при естественном холоде. Применяемое при этом сварочное оборудование должно быть адаптировано к условиям работы при низких климатических температурах, а сварочные материалы обеспечивать хладостойкость и равнопрочность получаемых соединений.

В связи с этим, при оценке качества любого продукта целесообразно оценивать не только его функциональные и эксплуатационные характеристики, но и степень воздействия окружающей среды, при которой продукт сохраняет заявленные качественные характеристики. Таким образом, для новых материалов и изделий, предназначенных для использования в сложных технических системах, должны быть разработаны методические основы климатических натуральных испытаний.

Цель работы разработка программ климатических испытаний сварочного оборудования и материалов при отрицательных температурах для оценки их качества и пригодности применения в условиях Севера и Арктики.

В рамках партнерского сотрудничества на базе ЦКП «Станция низкотемпературных натуральных испытаний» ИФТПС СО РАН совместно с ИФПМ СО РАН проводились климатические испытания современного сварочного оборудования и материалов. Испытывались выпрямители инверторного типа для ручной дуговой сварки фирм ООО «ФЕБ», ЗАО «ЭлектроИнтел», Kemppi, а также сварочные электроды марок УОНИ-13/МОРОЗ, Э50А-ХОБЭКС-К-54, LB-52TRU. В ходе работ были выявлены методические особенности проведения испытаний сварочного оборудования и материалов. Проведенные исследования позволили разработать программы климатических испытаний сварочного оборудования и материалов при отрицательных температурах.

Разработанные программы климатических испытаний позволяют выявить достоинства и недостатки испытуемого сварочного оборудования и материалов в условиях отрицательных температур. По результатам испытаний можно рекомендовать новые перспективные источники питания и сварочные материалы, а также разработать технологии сварки в условиях низких температур организациям, ведущим сварочно-монтажные и ремонтные работы в Северных и Арктических регионах России.

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Н.Г. ГОНЧАРОВ, Е.Е. ЗОРИН, А.А. ЮШИН, П.А. ПОНОМАРЁВ

ООО «НИИ Транснефть», г. Москва

E-mail: YushinAA@niitnn.transneft.ru

В настоящий момент требования к кольцевым сварным соединениям магистральных трубопроводов нефти и нефтепродуктов установлены исходя из срока эксплуатации 30 лет. Существующие тенденции в строительстве объектов трубопроводного транспорта, в том числе строительство в условиях Крайнего Севера, требуют увеличения срока эксплуатации до 50 лет. Повышение срока эксплуатации требует пересмотра показателей механических характеристик сварных соединений.

Целью проведения исследований является выявление связи между механическими характеристиками сварных соединений (временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение/сужение, ударная вязкость, твердость) и их долговечностью.

В работе рассматриваются сварные соединения, выполненные автоматической сваркой плавящимся электродом в среде активных газов и смесях (АПГ), автоматической сваркой порошковой проволокой в среде активных газов и смесях (АППГ) и автоматической сваркой под слоем флюса (АФ). Сварка стыков осуществлялась в соответствии с действующей нормативной документацией ПАО «Транснефть» в области сварочного производства. Для изготовления кольцевых сварных соединений применялись трубы класса прочности К55-К56 диаметром 720-1220 мм с толщиной стенки от 8 до 19 мм четырех ведущих российских производителей.

Для оценки параметров сопротивляемости разрушению проведен комплекс испытаний по определению механических характеристик сварных соединений и основного металла труб, а также испытания на малоцикловую усталость и трещиностойкость. Получены скорости роста трещины, критический коэффициент интенсивности напряжений, предельная пластичность для различных зон сварного соединения (для труб четырех ведущих российских производителей).

С целью формализации связи показателей механических характеристик сварных соединений и срока эксплуатации осуществляется разработка регрессионных моделей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 20 И 12Х18Н10Т

А.Л. ГОНЧАРОВ, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, Е.В. ТЕРЕНТЬЕВ, И.Е. ЖМУРКО, А.П. СЛИВА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
E-mail: GoncharovAL@mpei.ru

Целью работы являлось установление особенностей формирования структурных неоднородностей в разнородных сварных соединениях сталей 20 и 12Х18Н10Т, полученных аргонодуговой сваркой (АрДС) и электронно-лучевой сваркой (ЭЛС), а также их влияния на механические характеристики сварных соединений при растяжении и циклическом нагружении. Сварные соединения, выполненные ЭЛС, были получены без присадочного материала, а переменное смещение луча при сварке позволило получить образцы с различным содержанием хрома в металле шва. В работе исследовали образцы после ЭЛС с 3% и 9% хрома в металле шва. Сварные соединения, полученные АрДС, выполняли аустенитными швами с двумя типами присадочной проволоки. В первом случае использовали присадочную проволоку Autrod 308LSi с низким содержанием углерода (0,01%) и никелем в качестве основного аустенизатора, во втором случае применяли проволоку Г102 с содержанием углерода 0,4%, с марганцем в качестве аустенизатора, без никеля. После сварки полученные соединения подвергали изотермической выдержке при температуре 650°С в течение различного времени для формирования прослоек различной протяженности и изготавливали образцы для механических испытаний.

Явления формирования структурных неоднородностей в сварных соединениях, вызванные диффузионным перемещением углерода через границу сплавления сталей различного легирования, известны, и механизмы таких явлений описаны в литературе. В рамках классической теории диффузии перемещение углерода связано с его градиентом концентрации в твердых растворах свариваемых сталей. Однако такое представление не объясняет, например, явления восходящей диффузии. Из термодинамических представлений, движущей силой процесса является градиент химического потенциала, определяемый не только концентрацией, но и активностью углерода в твердом растворе. Последняя, в свою очередь, будет зависеть от содержания и типа легирующих элементов в твердом растворе. Кроме того, учитывая реальное поликристаллическое состояние металла, значительную роль в перемещении углерода оказывают процессы диффузии вдоль границ зерен и дислокаций. Поэтому можно утверждать, что на сегодняшний день не создано точных моделей для предсказания протяженности диффузионных прослоек в сварных соединениях разнородных сталей, учитывающих все многообразие факторов, определяющих их развитие. Несмотря на то, что рассматриваемые стали хорошо изучены в отдельности, получаемая при их соединении система является достаточно сложной, так как твердые растворы в структуре этих сталей различны по строению и химическим свойствам. Известно, что в сварных соединениях перлитных сталей с аустенитными после выдержки при повышенных температурах вблизи линии сплавления со стороны перлитной стали формируется обезуглероженная (ферритная), а в металле шва – науглероженная (карбидная) прослойка. Закономерности роста таких прослоек от температуры и времени подчиняются параболическому и экспоненциальному законам, что подтверждается, в том числе, и результатами данной работы.

Установлены различия в формировании диффузионной карбидной прослойки в металле шва, легированном никелем и марганцем. Главную роль в карбидообразовании играет хром, карбиды этого элемента выделяются в прослойке. Установлено, что при замене стабилизирующего аустенит элемента изменяются пути диффузионного перемещения углерода в аустените. При легировании аустенита никелем происходит объемная диффузия углерода, в то время как в марганцовистом аустените основным механизмом диффузионного перемещения углерода становится пограничная диффузия, которая осуществляется главным образом по границам зерен и субзерен аустенита. Рассмотрены механизмы образования и измерены протяженности кристаллизационных мартенситных прослоек в металле шва.

Ширина мартенситных прослоек в швах с марганцовистым аустенитом оказалась меньше и составляет не более 5 мкм. Показана возможность образования карбидной прослойки в менее легированном металле шва, выполненном ЭЛС, при низком содержании хрома со стороны аустенитной стали 12Х18Н10Т.

В результате механических испытаний установлено, что при растяжении сварное соединение работает в условиях упрочения мягкой (ферритной) прослойки за счет сдерживания поперечных деформаций более твердой (карбидной) прослойкой. Установлены пределы размеров мягкой прослойки, при которых не происходит разупрочнения сварного соединения, которые позволят переходить к предельным температурно-временным параметрам термообработки и эксплуатации сварного соединения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕРМОЭДС КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ

А.Л. ГОНЧАРОВ, А.В. ЧУЛКОВА, Р.В. РОДЯКИНА, В.К. ДРАГУНОВ, И.С. ЧУЛКОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
E-mail: reginarodyakina@mail.ru

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) разнородных сплавов существенное влияние на качество сварных соединений оказывают термоэлектрические явления, неразрывно связанные с переносом теплоты и электричества в зоне сварки. Одна из основных особенностей сварки таких материалов состоит в появлении термоэдс и термоэлектрических токов в стыке соединяемых деталей под действием нагрева, возникающего при ЭЛС потоком теплоты. Появляющиеся при этом термоэлектрические токи создают магнитное поле на поверхности и в области стыка свариваемой детали, что приводит к изменению траектории электронов пучка по толщине стыка и, как следствие, к образованию непроваров в свариваемом соединении.

В работе проведено исследование температурных зависимостей термоэдс конструкционных материалов различных структурных классов. При помощи термопар получены температурные зависимости для 24 марок сталей и 5 никелевых сплавов, а также чистой меди и двух медных сплавов. Градиент температур обеспечивался помещением термопары в высокотемпературную печь Nabertherm.

Из исследуемых сталей были выделены три группы с положительными, отрицательными и меняющими свой знак значениями термоэдс. В первой группе все стали имеют положительные зависимости с экстремумом, максимум которых достигается при температуре 600-800°C, после чего значения термоэдс начинают убывать. Большинство таких сталей имеют в своем составе повышенное содержание хрома.

Во второй группе термоэдс сталей имеют линейную зависимость от температуры, значения которой убывают примерно до температуры 1000°C, а затем наблюдается их незначительное возрастание. Основными легирующими элементами в сталях, отнесенных ко второй группе, являются хром (14-21%) и никель (9-25%).

В сталях, отнесенных к третьей группе, зависимость термоэдс от температуры сначала убывает практически до 600°C, затем значения термоэдс незначительно возрастают до максимума, который достигается в области температур 900°C, после чего снова начинают убывать.

Полученные температурные зависимости термоэдс конструкционных материалов различных структурных классов свидетельствуют о том, что в области высоких температур значения термоэдс близки для различных сталей. Таким образом, полученные результаты подтверждают связь термоэлектрических свойств материалов не только с их химическим составом, но также и со структурным и фазовым состоянием.

Установлено, что для сплавов на основе никеля температурная зависимость абсолютной термоэдс близка к линейной. Отрицательную абсолютную термоэдс имеют низколегированные и хромоникелевые стали. Термоэдс сталей мартенситного, аустенитно-мартенситного и мартенситно-ферритного классов имеют зависимости с экстремумом, максимум которых достигается в диапазоне температур 600-800°C, после чего значения термоэдс начинают убывать. Максимальное значение термоэдс при этом не превышает 8 мВ.

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ИМПУЛЬСА ТОКА ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

А.С. ГОРДЫНЕЦ, А.С. КИСЕЛЕВ, С.И. СКРИПКО

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
e-mail: SkripkoSt@gmail.com

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом является распространенным способом получения неразъемных соединений, что обусловлено широкими регулировочными возможностями параметров ее режима. В частности, находит применение импульсное управление процессом сварки деталей толщиной 0,25...1,00 мм.

В настоящее время наметилась тенденция по использованию мощных одиночных импульсов тока при аргонодуговой сварке деталей. Но этот способ обладает недостаточной проплавляющей способностью.

Известно, что амплитудно-временные параметры импульса тока оказывают влияние на характер проплавления свариваемых деталей [1]. С целью определения этого влияния были проведены экспериментальные исследования, при которых варьируемым параметром являлась форма одиночного униполярного импульса тока при фиксированной Ампер-секундной площади:

- 1) треугольная ($I_{и} = 200$ А; $\tau_{нараст.} = 25$ мс; $\tau_{спада} = 0$ мс);
- 2) треугольная ($I_{и} = 200$ А; $\tau_{нараст.} = 0$ мс; $\tau_{спада} = 25$ мс);
- 3) прямоугольная ($I_{и} = 200$ А; $\tau_{и} = 12,5$ мс);
- 4) прямоугольная ($I_{и} = 100$ А; $\tau_{и} = 25$ мс);
- 5) синусоидальная ($I_{и} = 160$ А; $\tau_{и} = 25$ мс).

Форму импульса тока синтезировали специальным генератором. Полярность тока в сварочной цепи задавали прямой. В качестве изделия использовали пластины толщиной 0,5 мм из стали 08кп и 12Х17. Неплавящийся электрод диаметром 1,0 мм марки ЭВТ-2 имел заточку рабочей поверхности – 30°, притупление – 0,02 мм. Расход защитного газа аргона задавали равным 5 л/мин. Межелектродный промежуток устанавливали равным 1,0 мм. При проведении исследований дугу зажигали бесконтактным способом.

Анализ полученных результатов показал, что при исследованных параметрах импульса тока максимальная глубина проплавления ($h = 0,5$) мм деталей из стали 12Х17 получена с использованием синусоидальной формы (№5) импульса тока, а минимальная ($h = 0,2$) мм – при прямоугольной форме (№3) импульса тока. При использовании пластин из стали 08кп глубина проплавления практически не зависит от формы импульса тока и составляет 0,17...0,20 мм.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что необходимы дополнительные исследования для определения взаимосвязи параметров режима горения дуги с ее проплавляющей способностью.

Список литературы

1. Киселев А.С. Управление технологическими свойствами дуги переменного тока при сварке алюминиевых сплавов малых толщин неплавящимся электродом: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Томск, 1998. –185 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

Е.А. ГРИДАСОВА

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток
E-mail: olvin@list.ru

В настоящее время, развитие современных систем железнодорожного транспорта идет по нескольким направлениям, основными из которых являются: повышение скоростей движения, увеличение нагрузки, передаваемой на ось колесной пары, длины и веса снаряженных составов и в целом более интенсивного использования инфраструктуры железных дорог. Все это может значительно влиять на увеличение диапазона вибраций в системе колесо-рельс, и, следовательно, заставляет ученых и инженеров уточнять результаты изысканий в данной области. Основными источниками высокочастотных вибраций являются удары колес на стыках, в местах сварки рельсовых плетей, в зоне локальных дефектов на поверхности катания как рельса, так и колеса, при этом их частотный спектр зависит от состояния рельсового пути, в том числе от шероховатостей, волнообразного износа и других неровностей на поверхностях катания, появляющихся, как от износа рельсовых плетей, так и после шлифования и фрезерования головки рельса специализированным подвижным составом, используемым для устранения локальных дефектов. Важным вопросом также является детектирование внутренних дефектов рельсов, расположенных на некоторой глубине от поверхности головки или подошвы рельса, а также прогнозирование их развития, с целью своевременного отслеживания перехода рельса из дефектной стадии в остродефектную. Предлагаемая методика проведения испытаний поможет лучше понять механизм образования некоторых типов дефектов в рельсовых плетях, а также планировать ремонтные работы на железнодорожном пути с точки зрения более полного использования ресурса рельсов.

В последнее десятилетие тенденция изучения поведения металла сварных соединений в условиях высокочастотной циклической усталости становится очень актуальной [1-3]. В большей степени это связано с недостаточной осведомленностью о влиянии подобных нагрузок на усталостные характеристики и работоспособность сварных конструкций, что и определяет актуальность настоящей работы. Исследование влияния высокочастотных вибраций на структуру сварных соединений рельсовой стали проводилось на серии образцов, изготовленных из рельса (рисунок 1) химический состав основного металла которого: С 0,74 %, Al 0,0236 %, Cr 0,0765 %, Cu 0,1253 %, Mn 0,8289 %, Ni 0,0752 %, P 0,0129 %, S 0,0109 %, Si 0,3142 %, Fe основа и др, а наплавленного металла: С 0,857 %, Al 0,1571 %, Cr 0,1185 %, Cu 0,0681 %, Mn 0,7575 %, Ni 0,0669 %, P 0,0158 %, S 0,0097 %, Si 0,8064 %, Fe основа и др. Такой тип рельса используется при замене рельсовых плетей на Транссибирской магистрали.

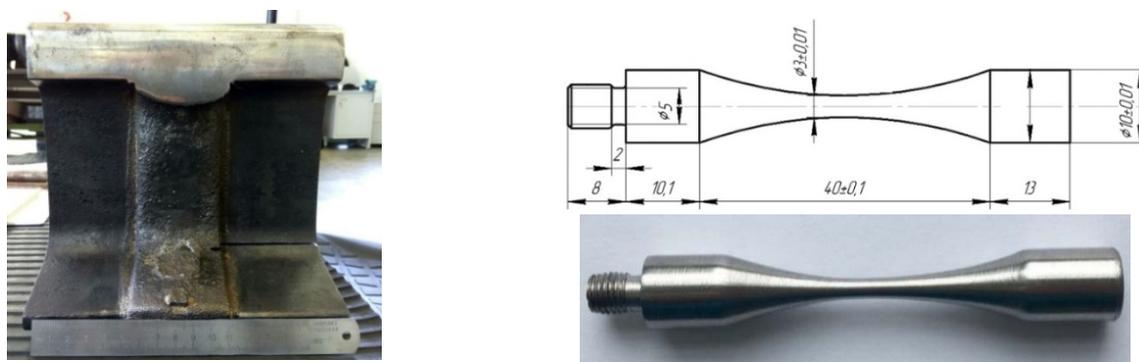


Рисунок 1 – Изготовленный образец для высокочастотных испытаний.

Высокочастотные испытания проводились на ультразвуковой установке ShimadzuUSF-2000 в импульсном режиме, с дополнительным охлаждением сжатым воздухом при симметричном цикле нагружения $R=-1$. Амплитуды и количество циклов представлены в

таблице 1. Амплитуды нагружения подобраны с учетом реальных действующих ударных нагрузок и расчетных площадей взаимодействия колеса и рельса.

Таблица 1 – Результаты экспериментов усталостных испытаний

№	Амплитуда σ_a , МПа	Кол-во циклов N	Причина разрушения
1	800	$1,0783 \cdot 10^4$	Трещина
2	750	$2,8376 \cdot 10^5$	Трещина
3	700	$1,0783 \cdot 10^4$	Трещина
4	650	$1,8663 \cdot 10^5$	Трещина
5	370	$1,1624 \cdot 10^9$	–

Анализ структуры образцов проводился двумя методами: металлографическим и измерением микротвердости. Исследования показывают, что дефекты сварных соединений такие как поры, микротрещины и включения, в случае высокочастотного нагружения выступают в качестве дополнительного источника зарождения усталостных трещин в материале (рисунок 2). Измерения микротвердости вдоль трещин показали средние значения HV 300-450, а в районе вершины было заметно лишь незначительное увеличение.

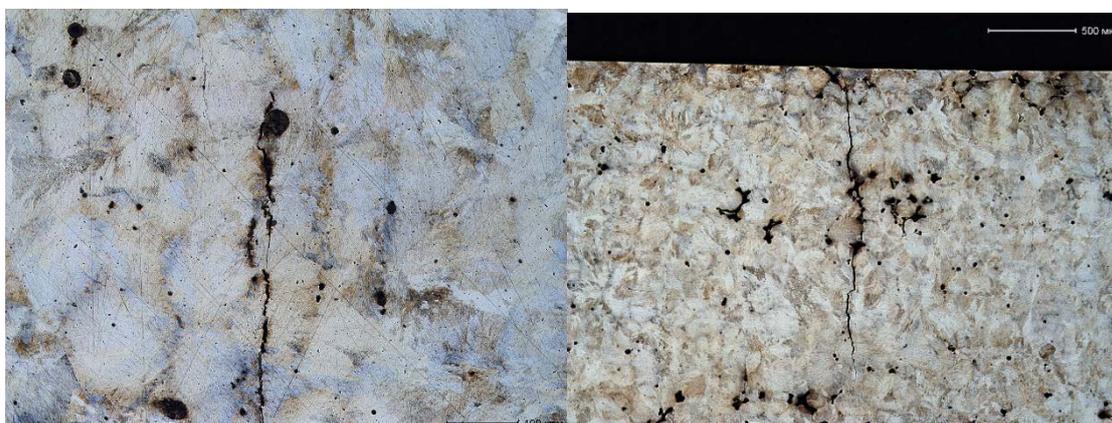


Рисунок 2 – Усталостные трещины после высокочастотного нагружения

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. В диапазоне амплитуд 800-650 МПа во всех образцах причинами разрушения являются трещины. Целенаправленное измерение микротвердости в зоне трещин показывает лишь незначительные ее изменения, что говорит о стремительности процесса разрушения. Нагружение сварных образцов с амплитудой напряжений $\sigma_a=370$ МПа на базе $1,16 \cdot 10^9$ циклов не привело к появлению усталостных трещин или иных структурных изменений.

2. При воздействии высокочастотных вибраций в сварном соединении накапливаются повреждения, приводящие к разрушению, однако на данном этапе исследования не удалось зафиксировать эти повреждения до образования трещин. Таким образом, этот вопрос требует более детального изучения.

Список литературы

1. He Chao, Liu Yongjie, Dong Jiangfeng, Wang Qingyuan, Wagner Daniele, Bathias Claude. Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue. International Journal of Fatigue. 2015;81:171–178.
2. Cremer M., Zimmermann M., Christ H.-J. High-frequency cyclic testing of welded aluminium alloy joints in the region of VHCF. International Journal of Fatigue. 2013;57:120–130.
3. Zhu M., Liu L., Xuan F. Effect of frequency on very high cycle fatigue behavior of a low strength Cr–Ni–Mo–V steel welded joint. International Journal of Fatigue. 2015;77:166–173.

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ НАПЛАВКИ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОГО ГОРЕНИЯ ДУГИ

К.В. ГРИНЯЕВ^{1,2}, И.А. ДИТЕНБЕРГ^{1,2}, А.Ф. КНЯЗЬКОВ³, А.Н. ГАВРИЛИН³, М.А. КОРЧАГИН⁴, С.А. КНЯЗЬКОВ³, И.В. СМРНОВ^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

⁴Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: kvgrinyaev@inbox.ru

На сегодняшний день многокомпонентные металлические системы, к которым относятся высокоэнтропийные сплавы, активно исследуются во всем мире. Актуальность изучения таких сплавов обусловлена уникальным комплексом их физико-механических характеристик. Основные направления исследований многокомпонентных сплавов связаны с выбором новых перспективных композиций; изучением особенностей их микроструктуры и комплекса уникальных свойств; выявлением механизмов пластической деформации; определением фазовой стабильности. Тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы представляют интерес для использования в атомной энергетике и аэрокосмической промышленности. Исследования в данных областях направлены в первую очередь на повышение термической стабильности прочностных свойств при высоких температурах.

В настоящей работе методом переплавки электрической дугой с неплавящимся электродом в защитной среде аргона при использовании импульсного режима получена многокомпонентная металлическая наплавка системы W-Ta-Mo-Nb-Cr-Zr-Ti-Fe-Cu на стальной неохлаждаемой подложке. В качестве заготовки использована упакованная в медную трубку смесь механически активированных порошков (W, Ta, Mo, Nb, Cr, Zr, Ti) тугоплавких металлов.

Исследования методами растровой электронной микроскопии, проведенные в различных сечениях наплавки, показали, что полученный в результате переплавки материал имеет градиентную структуру дендритного типа. Вблизи поверхности наплавки дендритная структура характеризуется высокой плотностью кристаллитов размерами в интервале 2 – 7 мкм. По мере приближения к центральной области наплавки размер кристаллитов смещается в сторону увеличения и составляет 3 – 10 мкм. При этом наблюдаются как области с высоким содержанием дендритов, так и области, где их содержание значительно (на порядок) ниже. В области сопряжения наплавки с подложкой размер отдельных кристаллитов увеличивается до 15 мкм.

В результате анализа особенностей распределения элементов установлено, что образующие прекурсор элементы (W, Ta, Mo, Nb, Cr, Zr, Ti) распределены по объему наплавки почти однородным образом.

Измерение микротвердости показало, что значения $H_{\text{ц}}$ изменяются от 1,5 ГПа на подложке до 9,7 ГПа на поверхности наплавки.

Полученные в результате теста на излом при температуре жидкого азота фрактограммы свидетельствуют об интеркристаллитном характере разрушения по элементам дендритной структуры.

Обсуждаются вопросы формирования структуры и достижения высоких значений микротвердости в зависимости от режима получения многокомпонентной наплавки.

Исследование проведено с использованием технологического оборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета, Института химии твердого тела и механохимии СО РАН и структурно-аналитического оборудования Томского материаловедческого центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

А.В. ГУДЕНКО, А.П. СЛИВА, А.В. ЩЕРБАКОВ, В.К. ДРАГУНОВ, М.В. ГОРЯЧКИНА

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
E-mail: alexsguddy@gmail.com

Существует множество технологий формообразования изделий с использованием аддитивного производства для прототипирования и изготовления изделий готовой или почти готовой формы из различных металлов и сплавов, отличающихся друг от друга типом сырья и источником энергии. К одним из наиболее перспективных методов построения деталей относится метод электронно-лучевой наплавки проволоки. Основными достоинствами данного метода является высокая производительность процесса и меньшая стоимость сырья по сравнению с порошковыми методами, причем проведение процесса наплавки в вакуумной камере оказывает положительное влияние на качество конечного продукта.

При разработке методики электронно-лучевой наплавки проволоки необходимо учитывать, что мощность электронного пучка, скорость подачи присадочной проволоки и скорость наплавки определяют не только геометрию наплавляемого изделия, но и структуру и свойства материала. Для получения тонкостенных изделий с высоким уровнем механических свойств необходимо стремиться к уменьшению теплового воздействия на материал проволоки и подложки. Снижение перегрева подложки и нижних слоев в изделия в ходе наплавки позволяет получать более узкие и высокие слои с мелкодисперсной структурой. Помимо основных параметров процесса, на геометрию слоев оказывает влияние осцилляция электронного луча за счет перераспределения его мощности и изменения характера гидродинамических процессов.

Целью данной работы являлось определение минимальной мощности электронного луча при различных скоростях подачи проволоки и наплавки, а также исследование влияния осцилляции пучка на геометрию валиков.

В результате проведенных исследований определена зависимость минимального тока луча, достаточного для плавления присадочной проволоки, от скорости ее подачи для коррозионностойкой стали 316L, титанового сплава 2В и железоникелевого сплава 36НХТЮ. Получена зависимость минимальной энергии электронного пучка от совместного действия двух факторов: скорости подачи проволоки и скорости наплавки. Установлено влияние типа и параметров развертки электронного луча на геометрию валиков.

ОСОБЕННОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

А.В. ГУСАРОВА, А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, Д.А. ГУРЬЯНОВ, К.Н. КАЛАШНИКОВ, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт физики прочности и материала ловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: tch7av@gmail.com

Получение материалов с заданной изначально структурой или текстурой является одной из наиболее актуальных задач для аддитивного производства на настоящее время. Это связано прежде всего с возможностью получения в формируемых изделиях не только необходимой формы, но и оптимальным расположением структурных составляющих относительно приложенных к детали внешних или внутренних воздействий, таким образом увеличивая или запас прочности изделия или ресурс его службы и, одновременно, снижая затраты на его изготовление. На настоящее время одними из наиболее широко встречающихся в литературе методов аддитивного получения деталей из металлических материалов являются метод селективного лазерного или электронно-лучевого плавления. В качестве филаментов для получения образцов используются порошковые или проволочные материалы.

В работе проводили исследования влияния параметров процесса получения титановых сплавов на формирование структуры и направленность роста дендритов при аддитивном электронно-лучевом процессе нанесения по проволочной технологии. Получение образцов проводили в вакуумной камере лабораторной установки в ИФПМ СО РАН. Исследования структуры и свойств образцов производили с помощью оптической и растровой микроскопии и в испытаниях на растяжение.

При аддитивном изготовлении титанового сплава ВТ6 структура образцов представлена крупными, вытянутыми в направлении от подложки вверх зернами, проходящими через большое количество слоев нанесенного материала и четко выделяющимися на боковой поверхности образцов. При этом снизу, у подложки, размер зерна существенно ниже, чем в верхней части. Как показали механические испытания такое положение оказывает существенное влияние на прочностные параметры образцов. Исследования показывают, что, несмотря на достаточно крупнокристаллическое строение зерен в получаемых образцах и отсутствие в данных зернах малоугловых границ, в них имеет место накопление плавных разориентировок от нижних слоев - к верхним.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление III.23.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НОВЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК СИСТЕМЫ Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo

А.И. ГУСЕВ, И.В. ОСЕТКОВСКИЙ, Н.А. КОЗЫРЕВ, А.А. УСОЛЬЦЕВ, Р.Е. КРЮКОВ

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Основными порошковыми проволоками для износостойкой наплавки горношахтного оборудования в Российской Федерации являются проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А и В по классификации МИС [1], причем для этих целей широко используются отечественные проволоки типа 40 ГМФР и 40ХЗГ2МФ [2-4], а так же импортные проволоки фирмы DRATEC (Германия) марки DT-SG 600 F и порошковые проволоки фирмы ESAB марок ОК Tubrodur 15.52, ОК Tubrodur 58 O/G M, основанные на тех же принципах легирования [5-8].

В работах [9-16], проведенных в условиях ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» определялось влияние введение различных элементов в порошковую проволоку системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo на эксплуатационную стойкость полученного при наплавке слоя металла. В данной работе приводится изучение изменения концентрации различных элементов в разработанных проволоках в системе Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo на износ и твердость наплавленного металла.

Наплавку осуществляли сварочным трактором ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки на пластины из стали 09Г2С. Изготовление проволоки проводилось на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 6 мм, оболочка выполнена из ленты Ст3. В качестве наполнителя использовались порошкообразные материалы: порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849-86, порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ1415-93, порошок высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757-91, порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755-91, порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722-97, порошок ферромолибдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759-91, порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130-94, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721-79, порошок вольфрамовый ПВН ТУ 48-19-72-92. В состав ряда образцов проволоки взамен аморфного углерода вводилась пыль газоочистки алюминиевого производства, со следующим химическим составом, масс. %: $Al_2O_3 = 21-46$; $F = 18-27$; $Na_2O = 8-15$; $K_2O = 0,4 - 6\%$; $CaO = 0,7- 2,3$; $SiO_2 = 0,5-2,5$; $Fe_2O_3 = 2,1-3,3$; $C_{общ} = 12,5-30,2$; $MnO = 0,07-0,9$; $MgO = 0,06-0,9$; $S = 0,09-0,19$; $P = 0,10-0,18$.

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС - 71. Измерение твердости исследуемых образцов выполняли по методу Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59. Металлографическое исследование микрошлифов осуществляли с помощью оптического микроскопа OLYMPUSGX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений $\times 100 - 1000$ после травления поверхности образцов в 4%-ном растворе азотной кислоты. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$. Дисперсность мартенсита оценивали при сопоставлении структуры с эталонами соответствующих шкал и размеров игл мартенсита с данными таблицы № 6 ГОСТ 8233-56. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений проводили по ГОСТ 1778-70. Полированную поверхность изучали при увеличении $\times 100$ с помощью металлографического микроскопа ЛабоМет-1И.

Скорость истирания наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка со следующими параметрами: диапазон измерения частоты вращения вала нижнего образца (диапазон А) $75 - 750 \text{ мин}^{-1}$; диапазон измерения момента трения (диапазон I) $1 - 10 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Разработаны новые, защищенные патентами РФ порошковые проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo для наплавки горношахтного оборудования.

По результатам проведенного многофакторного корреляционного анализа были определены зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковых проволок системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo. Полученные зависимости использованы для прогнозирования твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла.

Апробация на шахтах Кемеровской области защитных пластин шнеков очистного комбайна JOY4LS20, наплавленных разработанной порошковой проволокой, показало увеличение стойкости на 19,3%, по сравнению с аналогичными пластинами, наплавленными проволокой DRATEK.

Список литературы

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974 – 768 с.
2. М. В. Тепляшин. Исследование влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц / М. В. Тепляшин, В. Г. Комков // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ» 2013. – Т. 4. – № 4. – С. 1554-1561.
3. М. В. Тепляшин. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц / М. В. Тепляшин, В. Г. Комков, В. А. Стариенко // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ» 2013. – Том 4. – № 4. – С. 1543–1549.
4. Чейлях Я.А. Разработка состава экономнолегированной Fe-Cr-Mn стали с регулированием содержания и метастабильности аустенита / Чейлях Я.А., Чигарев В.В. // Журнал «Вестник» Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки, – Вып. 22 / 2011. – С. 103-108.
5. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron / Welding International. – 2008. – Vol. 22. – P. 796*800.
6. R. Kejžar & J. Grum. Hardfacing of Wear-Resistant Deposits by MAG Welding with a Flux-Cored Wire Having Graphite in Its Filling \ Welding International. 2005. – Vol 20. – P. 961-976.
7. R. Li. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings / R. Li, D. Y. He, Z. Zhou, Z. J. Wang & X. Y. Song. // Surface Engineering. 2014. – Vol 30. – P. 784-790.
8. H. R. Ma. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance / H. R. Ma, X. Y. Chen, J. W. Li, C. T. Chang, G. Wang, H. Li, X. M. Wang & R. W. Li // Surface Engineering. 2016. – Vol 46. – P. 1-7.
9. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Крюков Р.Е. Изучение влияния кобальта на структуру и свойства наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V металла // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 100-106.
10. I.V Osetkovskiy., N.A.Kozyrev, A.I.Gusev, O.A Kozyreva, R.A. Gizatulin, D.V. Valuev Influence of the cobalt additive on the flux cored wire of system Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V // Key engineering materials. – 2017. – Vol. 736. – pp. 63- doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.736.63.
11. Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Крюков Р.Е. Изучение структуры и свойств металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Mo-Ni-V-Co // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т.4.– № 2. – С. 113-119.
12. И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, М.В. Попова Износостойкость металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn- Ni- Mo- W-V и Fe-C-Si-Mn- Cr- Ni- Mo-V // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2017. – № 4 (22) – С. 21-24.
13. Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко Разработка новых порошковых проволок для наплавки деталей, работающих в условиях ударно-

- абразивного износа // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018.– Вып. 7(1423). – С.70-77.
14. Гусев А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Баченко Л.П. Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 898-906.
 15. Пат.2641590 МПК⁸ В23 К35/36 В 23 К35/36 Порошковая проволока/ Козырев Н.А., Гусев А.И., Галевский Г.В., Крюков Р.Е., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Козырева О.А.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».- № 2016125085/02(039292), Заявл. 22.06.2016.
 16. Пат. 2632505 РФ, МПК⁸ В23 К35/36 В 23Р6/00 Порошковая проволока/ Козырев Н.А., Осетковский И.В., Галевский Г.В., Крюков Р.Е., Гусев А.И., Козырева О.Е., Усольцев А.А.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».- № 2016125086/02(039293), Заявл. 22.06.2016.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН УСТОЙЧИВОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

В.И. ДАНИЛОВ¹, Н.В. АБАБКОВ²

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

E-mail: n.ababkov@ Rambler.ru

В последнее время возрос интерес к исследованию формирования и распространения полос Чернова - Людерса (ПЧЛ) как начальной стадии деформации. В самом деле, невозможно обойтись без исследований физической природы упругопластического перехода в металлах и сплавах, так как многие инженерные конструкции (особенно со сварными швами), используемые в технике, работают в области упругопластических деформаций и в них накапливаются значительные остаточные деформации.

В этой связи цель настоящей работы заключалась в выявлении особенностей формирования и развития ПЧЛ, а также зон устойчивой локализации деформации в образцах малоуглеродистой стали ВСтЗпс и 09Г2С, в том числе и со структурно-фазовой неоднородностью в виде сварных швов, выполненных дуговой сваркой.

В работе представлены результаты исследования процесса зон устойчивой локализации деформации в сварных соединениях конструкционных сталей при помощи метода цифровой корреляции изображений. Исследован упругопластический переход в материалах с резким пределом текучести, который реализуется по механизму формирования и распространения полос Чернова - Людерса. Установлено, что в структурно однородных образцах скорости зарождения полосы и скорость ее распространения отличаются более чем на порядок. Скорости движения фронтов полос Чернова - Людерса взаимно согласованы так, что сумма скоростей всех движущихся фронтов в любой момент времени деформирования является постоянной величиной. При увеличении скорости деформирования скорости фронтов полос возрастают. Если в материале присутствуют области с сильной структурно-фазовой неоднородностью, то зарождение полосы Чернова - Людерса происходит на границе таких областей. При этом кинетика, и морфология фронтов полосы внутри этих областей и в остальном металле существенно различаются.

В материале с сильной структурно-фазовой неоднородностью (сварной шов), то зарождение ПЧЛ происходит на границах такой области при условии, что внутренние напряжения здесь выше, чем в основном металле. При этом и кинетика, и морфология фронтов ПЧЛ внутри наплавленного металла шва существенно отличается. Так скорость движения фронтов может уменьшиться на порядок при переходе его в основной металл. Если в наплавленном металле и в зонах термического влияния внутренние напряжения, наоборот, ниже, то зарождение ПЧЛ происходит в основном металле. На границе сплавления перемещающийся фронт ПЧЛ останавливается и становится источником другой полосы, которая зарождается от границы и сначала распространяется в наплавленный металл шва. Только после того как будет продеформирован наплавленный металл продолжится дальнейшее движение фронта ПЧЛ в остальной части деформируемого объекта.

Таким образом, границы структурно-фазовой неоднородности с повышенными внутренними напряжениями являются местами и источниками зарождения ПЧЛ.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПРОБЕ ТЕККЕН

Д.И. ДЕРБЕНЕВ, М.А. ИВАНОВ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Email: denisderbenev@mail.ru

Одной из проблем сварки высокопрочных сталей является повышенная склонность к холодному растрескиванию вследствие диффузии водорода в область растягивающих напряжений, а также за счет неблагоприятной структуры металла сварного шва.

Сопrotивляемость образованию холодных трещин оценивают на пробе Тэккен по Российскому ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012 (рисунок 1), а также по международным стандартам AWS B4.0M: 2000, JSA - JIS Z 3158, BS EN ISO 17642-2:2005.

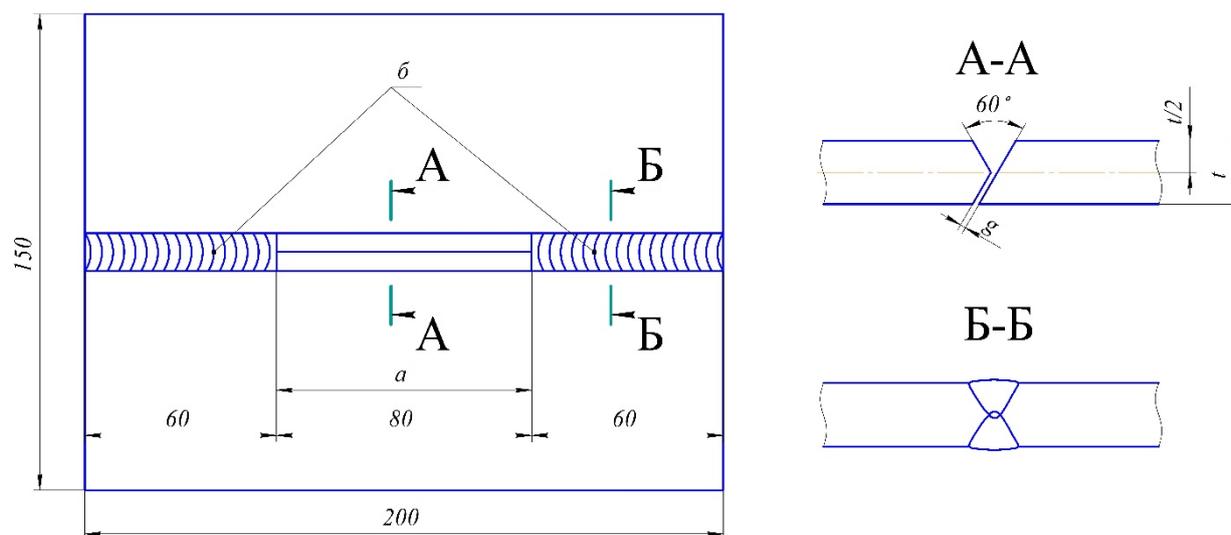


Рисунок 3 – Проба Тэккен по ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012

Данная методика испытаний позволяет сделать только качественное сравнение технологии, есть или нет трещины при конкретной технологии сварки. В тоже время, если пробы показали положительный вариант на различных проволоках, то какую из них выбрать, как наиболее подходящую сложно.

Для решения данного вопроса и получения количественной оценки были рассмотрены несколько вариантов модификации пробы Тэккен. Наиболее предпочтительными, на наш взгляд, является проверка образцов пробы Тэккен на изгиб и на статическое растяжение.

Для того, чтобы было возможно продолжить испытание по предлагаемым методикам, необходимо просто изменить схему вырезки образцов, на схему, представленную на рисунке 2. Данная схема реза даёт возможность установки образцов в захваты разрывной машины и на ролики пресса.

Испытание на изгиб проводятся в соответствии с ГОСТ 6996-66 тип XXVII. Нагрузка прикладывается до того времени, пока не начнется развитие трещины или же до момента разрушения образца. По окончании испытания определяется угол изгиба образца. Чем больше угол изгиба, тем лучше. Но необходимо отметить, что сравнение корректно только для режимов сварки с примерно равным количеством наплавленного металла, пример при сравнении различных марок проволок на одном режиме, или при различных температурах подогрева.

Испытание со статическим растяжением предполагается проводить подобно ГОСТ 6996-66 тип XV. В широкой захватной части образца нет необходимости, так как площадь сечения испытываемой зоны будет меньше площади основного металла. Предполагается, что сравнение будет производиться по напряжению, чем больше напряжение, тем больше

стойкость к образованию трещины. Но недостаток заключается в том, что невозможно сравнить технологии с различными материалами.

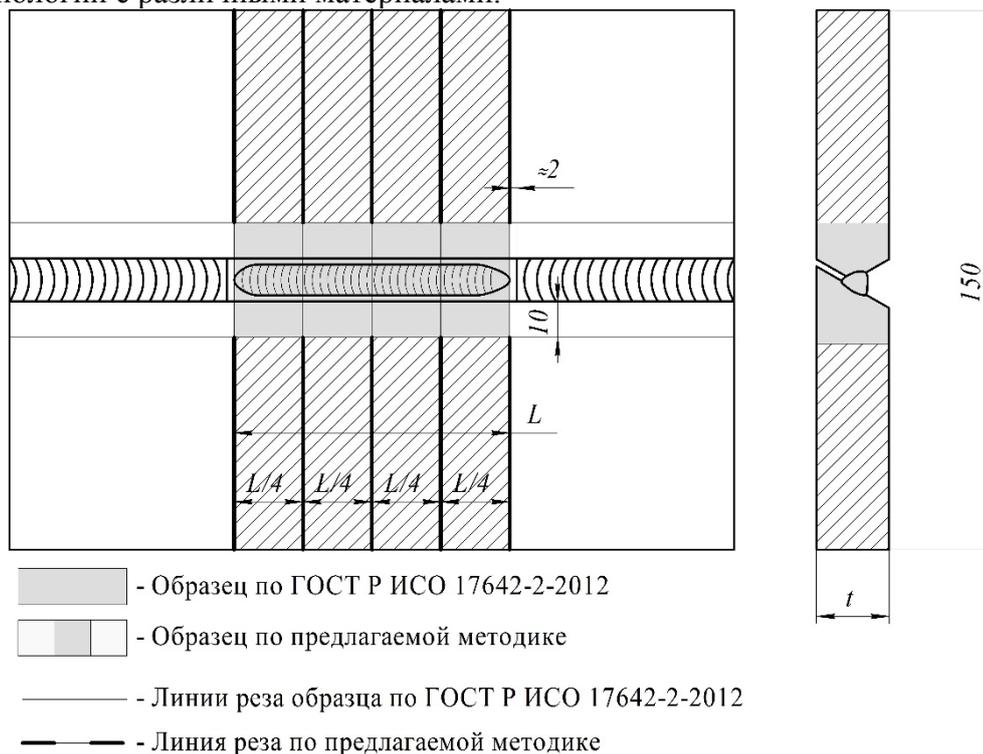


Рисунок 4 – Схема вырезки образцов из модифицированной пробы Тэккен

Предложенные методики испытаний на модифицированной пробе Тэккен предназначены для испытания только прошедших образцов по ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012, поэтому предлагается выполнять два образца пробы Тэккен для каждой испытуемой технологии. Первый образец необходим для установления наличия трещины, проведения металлографии и измерения твердости. А второй образец проверяется по ГОСТ 6996, но только после того, как испытание первого образца признают положительным.

В развитие данной работы необходимо проведение эксперимента, в котором будут проверены и скорректированы предложенные методики. Планируем выбрать одну методику испытаний на модифицированной пробы Тэккен, которая будет являться наиболее удобной и корректной для практического использования по оценке сопротивляемости образованию холодных трещин в сварных соединениях.

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАЦИОНАЛЬНОМУ ПОСТРОЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛС

В.К. ДРАГУНОВ, А.Л. ГОНЧАРОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
E-mail: DragunovVK@mpei.ru

В металле шва сварных соединений разнородных сплавов, полученных различными методами сварки плавлением, в том числе электронно-лучевой, у границы сплавления происходит образование участков переходного состава (кристаллизационные прослойки), свойства которых отличаются от свойств свариваемых сплавов и наплавленного металла. Это связано с тем, что в сварочной ванне у границы раздела твердой и жидкой фаз практически не происходит перемешивания жидкого металла. При электронно-лучевой сварке размер слоя переменного химического состава оказывается меньшим по сравнению с дуговыми способами сварки в силу того, что происходит более интенсивное перемешивание металла в сварочной ванне и сокращается время ее существования.

В связи с этим одной из важных проблем при сварке разнородных металлов и сплавов является получение требуемого химического состава металла шва, определяющего свойства сварного соединения в целом. Однако при сварке разнородных сталей возникают магнитные поля, источниками которых являются остаточная намагниченность ферромагнитных материалов и термоэлектрические токи. Эти поля взаимодействуют с электронным пучком и отклоняют его из области стыка. Поэтому обеспечение требуемой степени проплавления кромок и состава шва определяется заданной точностью позиционирования пучка относительно стыка.

Целью работы является научное обоснование технологических методов стабилизации пространственных параметров пучка относительно стыка при электронно-лучевой сварке разнородных сталей и сплавов, обеспечивающих требуемые химический состав, структуру и свойства сварных соединений комбинированных конструкций.

При наличии магнитного поля термоэлектрических токов и с учетом реальной формы шва введение коррекции пучка приводит к тому, что в вершине шва происходит преимущественное плавление одного сплава, а в корне – другого, причем эти площади проплавления не равны. Предложенный способ коррекции пространственного положения пучка в данном случае может привести к увеличению степени проплавления кромок неаустенитной стали, что может отрицательно сказаться на свойствах сварных соединений. Используя установленные особенности построения технологического процесса, можно получать качественные сварные соединения разнородных материалов большой толщины за счет устранения непроваров и обеспечения требуемой степени проплавления свариваемых кромок по толщине детали, а, следовательно, формирования заданных структуры и свойств сварных соединений.

ОСОБЕННОСТИ НАПЛАВКИ И НАПЫЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАБОЧИЕ ОРГАНЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

В.Н. ЕВЛАМПЬЕВ, П.Л. ЖИЛИН, А.А. КОШУРИНА, Н.С. УГЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород
e-mail: Bayzel222@mail.ru

Аннотация: Представлены возможности применения сварки, родственных процессов и технологий для восстановления и увеличения износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин.

В настоящее время в сельскохозяйственной отрасли предприятия несут экономические потери из-за ускоренного износа рабочих органов почвообрабатывающей, зерноуборочной и посевной техники.[1] В восстановлении и упрочнении нуждаются: диски культиватора сплошные и с вырезами, лапки стрельчатые, чистики, лемеха. Анализ условий работы различных деталей сельхоз. машин показывает, что основными видами износа являются абразия, адгезия, поверхностное разрушение и трибохимические реакции. Проведен анализ процента износа широкой номенклатуры деталей, выявлен их химический состав, составлена база данных в которую включен идентификационный номер деталей, наименование детали, процент износа, срок службы до выбраковки и возможные методы восстановления изношенных и упрочнения новых деталей.

При выборе методов восстановления и поверхностного упрочнения предпочтение было отдано композиционным наплавочным материалам на основе Ni Cr B Si + WC. Рассматривались также варианты применения покрытых электродов, порошковых проволок, специальных сферических порошков для лазерной наплавки, плазменно-порошковой наплавки, плит с порошковым покрытием и др.[2] Наплавлена опытная партия деталей, которые в настоящее время проходят испытания в полевых условиях на ряде сельхоз. предприятий.

Одновременно произведен анализ результатов с применением машин трения по методике ASTM G65, результаты представлены на диаграмме 1.



Рисунок 1 - Сопро­тивле­ние износу различных материалов

Работа выполнена в НГТУ им. Р. Е. Алексеева, при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора №14.Z50.31.0036. Тема: «Создание научной лаборатории композиционных и керамических материалов с применением к Арктическим транспортным средствам (LCCM)».

Список литературы

3. Гуляев В.П. Сельскохозяйственные машины. Краткий курс. – М.:Машиностроение, 2018. – 240 с.
4. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление. – М.: Издательство «Лань», 1985. – 238 с.

ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛОВ АЛЮМИНИЙ-СТАЛЬ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А.А. ЕЛИСЕЕВ, В.Е. РУБЦОВ, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт Физики Прочности и Материаловедения СО РАН, г. Томск
E-mail: alan@ispms.ru

Новым трендом в промышленности является использование многослойных разнородных материалов в конструкциях ответственного назначения. Данный тип материалов, называемый поли- и биметаллами, применяется в судостроении, авиакосмической отрасли, машиностроении и других отраслях промышленности. Биметаллы типа алюминий-сталь часто применяются в конструкциях, требующих одновременно высокой прочности, легкости и коррозионной стойкости с одной стороны, а также для сварки алюминия и стали через переходник. Получение таких биметаллов традиционными плавящими способами сварки осложнено возникновением на границе раздела хрупких интерметаллидов. Наиболее часто они производятся при помощи сварки взрывом, но она сложна в использовании. Более простым решением может быть получение биметаллов алюминий-сталь при помощи сварки трением с перемешиванием.

Целью данного исследования является выявление особенностей формирования соединения нержавеющей стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМг5 в процессе сварки трением с перемешиванием.

Толщина листового проката АМг5 составляла 1,5 мм, пластины стали 12Х18Н10Т – 5 мм. Проходы сваркой трением с перемешиванием осуществлялись со стороны листа алюминия, расположенного внахлест на листе стали. Для сварки использовался инструмент из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 с длиной пина 1,5 мм. Сварка проводилась при разных технологических параметрах: частота вращения инструмента 800-1000 об/мин, аксиальная нагрузка на инструмент 700-850 кг, подача инструмента 250-350 мм/мин. Структура шва исследовалась с применением оптической световой и растровой электронной микроскопии.

Геометрия эксперимента была устроена таким образом, что пин инструмента в процессе сварки во избежание износа перемешивал только материал алюминиевого сплава АМг5 и не касался стальной подложки, однако при высоком усилии создаваемое подъемное движение материала алюминия также за счет сил адгезии затягивало материал стальной подложки. Данный эффект в зарубежной литературе в общем случае называется «hooking», поскольку затягиваемый материал подложки имеет крючкообразную форму. Установлено, что изменение технологических параметров сварки трением с перемешиванием влияет на размер данного крючка. В частности, наибольший крючок наблюдался при режиме с максимальным значением нагрузки на инструмент. При этом по границе слоев на всех режимах не происходило образование хрупких интерметаллидов, а соединение представляло собой механическую смесь.

Из результатов исследования можно сделать вывод, что для образования биметаллического соединения алюминий-сталь сваркой трением с перемешиванием необязателен контакт инструмента и подложки, а наиболее сильно влияющим технологическим параметром на качество соединения является нагрузка на инструмент.

УПРОЧНЕНИЕ КАРБИДОМ БОРА ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Е.Н. ЕРЕМИН, А.С. ЛОСЕВ, И.А. ПОНОМАРЕВ, С.А. БОРОДИХИН, А.Е. МАТАЛАСОВА

Омский государственный технический университет, г. Омск
E-mail: weld_techn@mail.ru

Надежность и долговечность запорной арматуры нефтехимических производств в значительной мере зависят от работоспособности уплотнительных поверхностей деталей. Для её повышения их наплавляют наплавочными материалами на основе аустенитно-ферритных дисперсионно-твердеющих Cr-Ni-Si сталей с твердостью 40-50 HRC [1].

Металл покрытий, наплавленный такими материалами, имеет высокую коррозионную стойкость. Однако такие покрытия склонны к трещинообразованию. Поэтому для предотвращения растрескивания покрытий при наплавке необходимо применять предварительный подогрев деталей, достигающий 500° С. В свою очередь, твердость таких покрытий определяется концентрацией в их составе основных легирующих элементов, количеством ферритной фазы и степенью её распада при нагреве.

Одним из способов упрочнения литого металла является легирование его бором [2]. Выполненными ранее исследованиями установлено, что введение боридных соединений в некоторые хромоникелевые стали обеспечивает получение покрытий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками [3, 4]. Однако упрочнение высокохромистых сталей карбидом бора изучено недостаточно.

В связи с изложенным, исследовали структуру и эксплуатационные свойства металла системы Cr-Ni-Mo-Mn-Si-Ti-Nb-B, полученного наплавкой порошковой проволокой, в состав которой дополнительно введен карбид бора. Для сравнения производили также наплавку близкой по составу известной порошковой проволокой ПП-АН133 (10X17H9C5ГТ) [5].

Установлено, что по результатам дюрOMETрических исследований и испытаний на износостойкость металла покрытий наилучшими свойствами обладает металл покрытия, полученный порошковой проволокой содержащей 1,0% В₄С. Он превосходит металл, полученный известной проволокой (ПП-АН133), по твердости в 1.7 раза и по износостойкости в 2.5 раза.

Показано, что такая сталь после наплавки имеет композиционную структуру, состоящую из пересыщенного легирующими элементами твердого раствора с аустенитно-мартенситной матрицей и эвтектической составляющей (Mo, Cr, Fe, Nb)₂B. В результате старения такого наплавленного металла при 500 °С в течение 2 часов на межфазных границах α/δ метастабильный феррит претерпевает распад с образованием σ – фазы, представляющей собой заостренные пластины размерами 300÷550 нм. Кроме того, старение приводит к упрочнению матрицы мелкодисперсными карбоборидными и интерметаллидными фазами (Cr, Mo, Fe, Nb, Ti)₂₃(C,B)₆, (Fe, Cr, Si)₂(Mo, Ti) и (Ni, Fe)₃Ti, обуславливающими высокие показатели твердости и износостойкости.

Применение данной проволоки в качестве наплавочного материала позволяет существенно повысить работоспособность и надежность узлов запорной арматуры, работающих на истирание в контакте с агрессивными средами.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01224).

Список литературы

1. В.С. Степин, Е.Г. Старченко, Ю.С. Волобуев [и др.] Современные наплавочные материалы для уплотнительных поверхностей арматуры АЭС и ТЭС // Арматуростроение. – 2006. – № 2. – С. 55-56.
2. Лякишев Н.П. Боросодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плипер, С.И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.
3. А.А. Артемьев, Г.Н. Соколов, Ю.Н. Дубцов [и др.] Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением //

Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 2 – С. 44-48.

4. Eremin E. N. Using boride compounds in flux-cored wires for depositing maraging // Welding International. – 2013. – vol. 27, is. 2. – P. 144-146.
5. ГОСТ 26101-84. Проволока порошковая наплавочная. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 24 с.

ОСОБЕННОСТИ СВАРИВАЕМОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ

Л.А. ЕФИМЕНКО, А.А. РАМУСЬ, И.Ю. УТКИН

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва
E-mail: svarka@gubkin.ru

Развитие системы магистрального транспорта в последние годы связано с активным использованием высокопрочных трубных сталей нового поколения, таких как К60, К65, а в перспективе и К90. Рост прочностных свойств сталей этих классов позволяет существенно сократить металлоемкость трубопроводов, изготовленных из них, за счет уменьшения толщины стенки трубы.

В процессе сварки в зоне термического влияния высокопрочных сталей формируется структурно-фазовый состав, отличающийся от исходного, что часто является причиной ухудшения механических свойств.

В данной работе приведены результаты исследования свариваемости малоуглеродистых микролегированных высокопрочных сталей для трубопроводов категории прочности К60-К70. Изучены особенности кинетики распада аустенита в условиях сварочных процессов, применяемых и перспективных к использованию при строительстве магистральных трубопроводов, и их влияние на структурно-фазовые превращения и изменение механических характеристик сварных соединений.

При определенных теплофизических условиях процессов сварки возможно существенное снижение прочностных характеристик в зоны термического влияния, а также уменьшение сопротивления хрупкому разрушению, особенно металла околошовного участка. При использовании высококонцентрированных источников энергии проявляется склонность к формированию в зоне термического влияния закалочных структур.

На основе изучения взаимосвязи структуры и ее морфологии с параметрами хрупкого разрушения определен оптимальный структурно-фазовый состав и дисперсность его элементов, гарантирующие значения ударной вязкости не ниже нормативных.

Установлены температурные границы участка разупрочнения в зоне термического влияния и скорости охлаждения позволяющие сформировать структурно-фазовый состав, обеспечивающий равнопрочность сварного соединения.

Показано, что исследованные трубные стали, по сравнению с традиционно-применяемыми (17ГС, 09Г2С и др.), при наличии закалочных структур в зоне термического влияния обладают меньшей склонностью к образованию холодных трещин в сопоставимых условиях эксплуатации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТРУБНОЙ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60 НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

С.В. ЖАРКОВ^{1,2}, П.П. СТЕПАНОВ¹, В.А. КАРХИН²

¹ АО «Выксунский металлургический завод», г. Выкса

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

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

Высокий уровень механических свойств в современных трубных сталях достигается за счет целенаправленного формирования дисперсной микроструктуры определенного типа в ходе контролируемой прокатки. Вариативность композиции легирования и технологии прокатки трубных сталей позволяет достигать необходимый уровень свойств в прокате различными вариантами [1]. Однако, важно не только обеспечить высокий уровень свойств в прокате, но и довести его до конечного продукта – трубы и трубопровода, а это уже куда более сложная задача. Так при сварке исходная микроструктура металла в зоне термического влияния (ЗТВ) претерпевает воздействие нагрева и естественным образом деградирует. Наряду с ростом аустенитного зерна в ЗТВ происходят и другие металлургические процессы, характер и течение которых напрямую зависит от исходного состояния металла [2].

Цель работы: исследование влияния композиции легирования трубной стали класса прочности К60 и тепловложений при сварке на сопротивление хрупкому разрушению сварного соединения при пониженных температурах; установление микроструктурных механизмов формирования свойств в ЗТВ сварного соединения.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей

Сталь	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Mo	Al+Cu+N+Ti+Nb	C _{экв}
К60-1	0,04	0,25	1,65	0,2	---	---	0,2	0,25	0,40
К60-2	0,07			0,2	---	0,02	---	0,25	
К60-3	0,05			0,2	0,2	---	---	0,20	
К60-4	0,05			---	0,2	---	---	0,10	

Результаты:

Испытания на свариваемость проводили путем термоциклирования образцов по сварочным термическим циклам на Gleeble 3180 с последующим испытанием образцов на ударный изгиб. График зависимости средних значений ударной вязкости от температуры (рисунок 1) свидетельствует, что исследуемые стали характеризуются смещенным температурным интервалом хладноломкости. Для сталей К60-1 и К60-2 температура испытания -20 °С находится ниже нижнего порога хладноломкости, этим фактом могут быть объяснены относительно низкие результаты испытаний сталей по различным режимам термоциклирования.

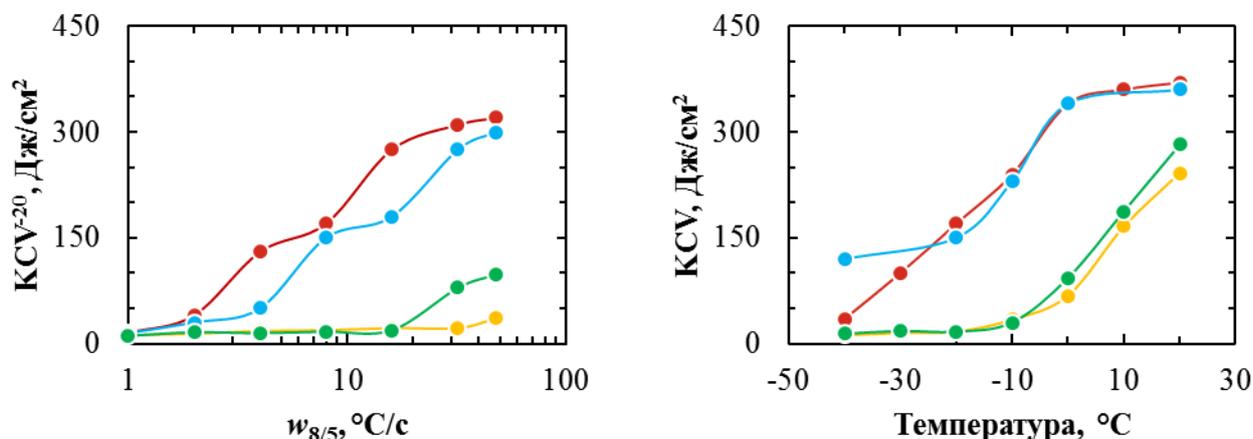


Рисунок 1 – Результаты испытаний сталей на ударный изгиб (средние значения):

- а – для различных режимов термоциклирования при одной температуре испытания (-20 °С);
- б – при различных температурах после термоциклирования по одному режиму ($w_{8/5} = 8$ °С/с)

Анализ конечной микроструктуры образцов (рисунок 2) показал, что структура всех исследуемых сталей состоит преимущественно из реечного и гранулярного бейнита. С увеличением скорости охлаждения наблюдается измельчение и изменение соотношения между составляющими микроструктуры, происходит замещение зерен гранулярного бейнита на бейнит реечной морфологии. Однако результаты исследований свидетельствуют, что в рамках единого режима термоциклирования конечная структура всех исследуемых сталей остается схожей. Негативное влияние М/А составляющей на ударную вязкость также представляется неоднозначным, т.к. динамика изменения доли М/А составляющей в микроструктуре у всех исследуемых сталей подобная: с ростом скорости охлаждения объемная доля М/А составляющей в микроструктуре снижается; но в вязкое состояние переходят только стали, композиция микролегирования которых содержит хром (К60-3 и К60-4) и не содержит ванадий и молибден (К60-1 и К60-2).



Рисунок 2 – Конечная микроструктура сталей после термоциклирования ($w_{8/5} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$)

Поскольку исследуемые параметры микроструктуры не объясняют смещение порога хладноломкости, можно предположить, что на сопротивление хрупкому разрушению металла на исследуемом участке ЗТВ сварного соединения композиция легирования оказывает влияние через более тонкие особенности микроструктуры. Так влияние карбидообразующих элементов на температуру хрупко-вязкого перехода может быть связано с процессами дисперсионного упрочнения.

Выводы:

1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что трубные стали одной категории прочности, с одинаковым углеродным эквивалентом, схожей микроструктурой и свойствами в прокате, после воздействия сварочного термического цикла, могут характеризоваться принципиально отличным друг от друга уровнем сопротивления хрупкому разрушению.

2. Повышенные вязкостные свойства металла в зоне термического влияния сварного соединения в ряде случаев не могут быть достигнуты только путем изменения технологии сварки, снижением тепловложений и ограничением углеродного эквивалента. На сопротивление хрупкому разрушению, композиция легирования стали может оказывать более существенное влияние, чем тепловложения при сварке.

3. Для исследуемых сталей уровень сопротивления хрупкому разрушению, после воздействия сварочного термического цикла, определяется главным образом положением порога хладноломкости.

Список литературы

1. Степанов П.П., Зикеев В.Н., Эфрон Л.И. и др. Улучшение свариваемости стали для толстостенных труб большого диаметра путем оптимизации химического состава // *Металлург.* – 2010. – № 11. – С. 62-67.
2. Худяков А.О. Влияние химического состава основного металла на вязкие свойства зоны термического влияния электросварных труб большого диаметра // *Вестник ЮУрГУ.* – 2014. – Т 14. – № 3. – С. 55-61.

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СВАРКИ И НАПЛАВКИ С ПОДОГРЕВОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

П.Л. ЖИЛИН, Е.А. ГЕРАСИМОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород
E-mail: cc.nn@mail.ru

Исследования по применению дополнительной подогреваемой присадочной проволоки проводились применительно к различным способам сварки и наплавки. Среди них сварка и наплавка проволокой под флюсом, в среде защитного газа плавящимся электродом, в среде защитного газа неплавящимся электродом, плазмой лазером и т.д. Выявлены общие закономерности применения бездугового подогрева проволоки, в том числе в увеличенном вылете электрода. Разработаны методики расчета режимов подогрева дополнительных присадочных проволок различных диаметров и химических составов. Определены требования к источникам питания и отдельным блокам подогрева, которые могут встраиваться в различные источники питания для сварки и наплавки. Проведены исследования влияния различных количеств присадочной проволоки на форму и размеры сварных швов и наплавленных валиков.

Автоматическая дуговая наплавка и сварка, с бездуговой подачей дополнительного присадочного материала в виде подогретой проволоки в плавильное пространство, обладает значительными преимуществами по отношению к базовому процессу наплавки и сварки одной электродной проволоки под флюсом, в частности, увеличением производительности наплавки в 1,5-2 раза при одновременном уменьшении глубины проплавления и доли участия основного металла в 2-3 раза.

С использованием полного факторного эксперимента построены математические модели длины сварочной ванны, относительной массы шлака, глубины проплавления, высоты наплавки, площади наплавки, доли участия основного металла, площади зоны термического влияния в зависимости от параметров режима наплавки и сварки с дополнительной присадочной проволокой (ДПП). На основании анализа математических моделей предложена методика расчета параметров режима наплавки и сварки с ДПП, определены важнейшие механические свойства износостойкой и коррозионностойкой наплавки и различных сварных соединений, а также влияние на них параметров режима наплавки и сварки с ДПП [1,2,3].

Применение стандартного оборудования, состоящего из унифицированных узлов (двух-головочный сварочный трактор или сварочная головка, сварочная головка и полуавтомат, сварочный трактор и полуавтомат, два полуавтомата, ручная TIG горелка с каналом для подачи проволоки, автоматическая TIG головка с изолированным токоподводом к проволоке и т.д.) позволяет осуществить внедрение технологического процесса наплавки или сварки с минимальными капитальными затратами. Одновременно с повышением производительности труда сокращается число рабочих, повышается качество швов за счет уменьшения глубины проплавления и доли участия основного металла и применения комбинаций наплавочных материалов с различными свойствами, снижается расход электроэнергии и флюса, сокращается число наплавленных валиков и проходов в разделках, уменьшается площадь зоны термического влияния и тепловложение в основной металл в целом. Улучшается внешний вид швов и санитарно-гигиенические условия труда на рабочем месте.

С помощью специального программирования сварочного источника питания можно управлять режимом сварки TIG и источником тока для подогрева проволоки, а также подачей проволоки и общим протеканием сварочного процесса. Синхронная пульсация сварочного тока и подогрев присадочной проволоки могут быть использованы для улучшения качества сварки или для облегчения сварки в неудобном положении. Важными параметрами режима сварки являются ток импульса, ток нагрева проволоки, скорость подачи проволоки, высота сварочной дуги, включая параметры колебаний. Сварка TIG с подачей

горячей проволокой может существенно повысить производительность наплавки по сравнению с подачей нейтральной проволокой.

В то время как при сварке TIG с холодной проволокой можно достичь скорости сварки около 20 см/мин, при сварке TIG с горячей проволокой в автоматическом режиме можно достичь скоростей сварки в пределах от 80 до 100 см/мин. Результаты: меньшие затраты времени на сварку, более узкие зоны термического влияния, меньший риск возникновения горячих трещин и меньшее перемешивание металла шва с основным металлом.

Совместно с одной из отечественных фирм изготовлен опытный образец инверторного источника подогрева присадочной проволоки и проведены промышленные испытания сварных конструкций, применительно к технологиям применяемых Газпромом.

Влияние дополнительной подогреваемой проволоки на величину остаточных деформаций. Для исследования взяты пластины размером 200×50 мм из стали 08X15H5Д2Т, толщиной 1,2 мм, 1,5 мм, 3,5 мм. Сварка пластин выполнена встык без зазора тремя видами сварки: автоматической TIG HOT WIRE, автоматической аргонодуговой, ручной аргонодуговой на установке пневмоклавишного типа, отечественного производства. Выполнены линейные замеры пластин до сварки и после сварки в четырех местах, а также выполнены замеры угловых деформаций. Полученные результаты на основе экспериментальных замеров поперечной усадки сварных соединений показывают, что наименьшая поперечная усадка получена при автоматической сварке TIG HOT WIRE независимо от исследуемой толщины. Данные результаты представляют интерес для предприятий Авиапрома.

Произведены расчеты оптимальных режимов подогрева, в том числе для технологий наплавки узлов подводной добычи углеводородов, применительно к технологиям, применяемым Газпромом по импортозамещению.

Список литературы

1. Конищев Б.П., Жилин П.Л., Шаяков В.В. Автоматизация наплавочных работ в ПО «ВТОРЧЕРМЕТ» // Сварочное производство. – 1987. – № 6. – С. 5-6.
2. Конищев Б.П., Жилин П.Л. Сравнительная оценка двух вариантов дуговой сварки под флюсом с подачей присадочной проволоки // Автоматическая сварка. – 1988. – № 3. – С. 16-17.
3. Конищев Б.П., Жилин П.Л., Лебедев С.А. Исследование увеличения производительности и качества процесса сварки в CO₂ с дополнительной холодной присадкой // Сварка и диагностика. – 2015. – № 4. – С. 42-46.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Н.Л. ЗАЙЦЕВ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

E-mail: koka.zaitceff@gmail.com

Коэрцитивная сила (H_c) реагирует на всякое изменение напряжённно-деформированного состояния (НДС). Поэтому для оценки НДС стальных конструкций часто используют результаты коэрцитиметрических измерений. Однако применяемые на практике способы имеют недостатки, обусловленные принимаемыми ошибочными допущениями.

Так в большинстве опубликованных работ, методика строится на результатах одноосного растяжения плоских образцов. Плоский образец подвергают одноосному растяжению с одновременным измерением коэрцитивной силы в направлении вдоль приложенной растягивающей нагрузки. Получают тарировочную кривую изменения коэрцитивной силы в зависимости от величины растягивающих напряжений. Нагружение и измерение значений H_c производят вплоть до разрушения образца. Принимается допущение, согласно которому текущее значение H_c на тарировочной кривой однозначно определяет, какой области диаграммы растяжения (упругой, упруго-пластической, зоне разрушения) соответствует структура металла в данный момент.

Поэтому для определения НДС реальной конструкции нужно только измерить на этой конструкции значение H_c и по диаграмме одноосного растяжения плоского образца, изготовленного из той же марки стали, что и обследуемая конструкция, найти величину напряжения, соответствующую измеренной H_c на конструкции. Т.е. принимается допущение, что в металле обследуемой конструкции в процессе её эксплуатации накапливаются такие же повреждения структуры металла (такая же пластическая деформация), как в растягиваемом плоском образце. Такое допущение ошибочно. Оно имеет непосредственное отношение только к испытанному образцу и не может быть распространено на обследуемую конструкцию, поскольку значения коэрцитивной силы в ней для одного и того же металла изначально могут иметь разброс, обусловленный различными причинами, связанными не только с условиями эксплуатации, но и с технологическим переделом при изготовлении конструкций.

Определение НДС сложной нагруженной конструкции по результатам измерения H_c при одноосном растяжении приведёт к дополнительным погрешностям, так как значения H_c , измеренные в различных направлениях на конструкции слабо коррелируют с результатами измерения H_c при одноосном напряжённом состоянии.

Оценка НДС сложной нагруженной конструкции по результатам измерения коэрцитивной силы затруднена в связи с отсутствием тарировочных образцов, позволяющих воспроизводить в них напряжённое состояние, соответствующее обследуемой конструкции.

Нами разработан полый крестообразный образец с тонкими стенками, состоящий из четырёх нагрузочных плечей и двух рабочих пластин той же марки стали, что и обследуемая труба. Нагрузочные плечи и пластины соединены сварными швами. Путём приложения к нагрузочным плечам крестообразного образца изгибающих моментов в рабочих пластинах можно воспроизвести НДС, практически с любым соотношением компонент напряжённного состояния.

Предлагается следующая методика определения НДС в трубопроводе. На опасном участке трубопровода фиксируют рабочее давление транспортируемого продукта, диаметр,

толщину стенки и марку стали трубы. В двух взаимно перпендикулярных направлениях (по оси трубы и в кольцевом направлении) измеряют значения коэрцитивной силы H_c^k и H_c^{oc} .

Изготавливают крестообразный образец с рабочими пластинами из металла, подобного металлу трубы. В центре рабочей пластины монтируют тензодатчики перемещений. Нагружают крестообразный образец. Изгибом одной пары нагрузочных плечей задают деформации соответствующие деформациям в кольцевом направлении трубы (ϵ_k), изгибом другой пары – в продольном направлении (ϵ_{oc}). Измеряют деформации ϵ_k и ϵ_{oc} и соответствующие им значения коэрцитивной силы H_c^k и H_c^{oc} . Варьируя изгибающими моментами, получают деформации ϵ_k и ϵ_{oc} , при которых значения коэрцитивной силы, измеренные на образце, совпадут по величине с измеренным H_c^k и H_c^{oc} на трубе. По полученным значениям деформаций ϵ_k и ϵ_{oc} находят напряжения, действующие в трубе по формулам:

$$\sigma_k = \frac{(\epsilon_k + \mu\epsilon_{oc})E}{1-\mu^2} \frac{(\epsilon_k + \mu\epsilon_{oc})E}{1-\mu^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{oc} = \frac{(\epsilon_{oc} + \mu\epsilon_k)E}{1-\mu^2} \quad (2)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_k^2 - \sigma_k\sigma_{oc} + \sigma_{oc}^2} \quad (3)$$

Где σ_k и σ_{oc} – кольцевые и осевые напряжения, действующие в трубе; E – модуль упругости металла трубы; μ – коэффициент Пуассона.

К ВОПРОСУ ОБРАЗОВАНИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН В ТРУБОПРОВОДАХ

Н.Л. ЗАЙЦЕВ¹, С.А. СИЛЬВЕСТРОВ²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

² ООО “Астропроект”, г. Казань

E-mail: koka.zaitceff@gmail.com

В процессе эксплуатации магистральные газопроводы в ряде случаев покрываются сетью параллельных поверхностных трещин, которые затем прорастают вглубь и приводят к разрушению трубопровода. Это явление названо стресс-коррозией. В большинстве случаев стресс-коррозия происходит на фоне общей и язвенной коррозии. Несмотря на большое количество исследований единое мнение о причинах и механизмах этого явления отсутствует. По этой причине до сих пор не решена проблема надёжной защиты от стресс-коррозии.

На основании изучения литературных данных, анализа данных экспертных заключений по разрушению трубопроводов и проведения собственных физических экспериментов предлагается следующая физическая модель стресс-коррозии.

Магистральные газопроводы в подземном исполнении защищают изоляционной пленкой и электрохимической защитой (ЭХЗ). Наличие ЭХЗ сдерживает процесс образования ржавчины, повышая тем самым эффективность защиты от общей коррозии, но не от стресс-коррозии. Дело в том, что отрицательный “защитный” потенциал (особенно повышенный) запускает другие явления. В частности, в грунтовой воде всегда имеются положительные ионы водорода H^+ (катионы), которые под действием отрицательного заряда ЭХЗ притягиваются к поверхности металла трубы. На поверхности металла положительные ионы водорода получают электрон, превращаясь в атомарный водород. Вследствие малых размеров и высокой подвижности атомарный водород проникает в металл трубы, где объединяется в молекулу водорода H_2 . Молекулы водорода, накапливаясь в межкристаллитных микропорах и других несплошностях, создают огромные давления внутри этих несплошностей. Это приводит к искажению кристаллической решётки металла и образованию дополнительных дислокаций. Дислокации блокируются малоподвижными молекулами водорода. Блокировка дислокаций приводит к потере пластичности металла и его охрупчиванию. Высокое внутреннее давление (от накопления водорода) создает механические напряжения, которые, складываясь с механическими напряжениями от рабочих нагрузок, достигают критического уровня. Внутренние связи в металле разрываются, появляются трещины, которые растут вглубь и в какой-то момент трубопровод разрушается. Авторами проведено достаточно большое количество опытов по выявлению наличия водорода внутри металла, подверженного КРН. Полученные результаты подтвердили правильность вышеизложенной модели стресс-коррозии.

Во-первых, в зонах растрескивания металла концентрация водорода оказывалась существенно выше, чем на неповреждённых участках трубы.

Во-вторых, концентрация водорода всегда выше на внешней части стенки труб (водород поступает снаружи, из грунтовой воды).

В-третьих, пластичность и прочность образцов тем ниже, чем выше концентрация водорода.

Принято считать, что на нефтепроводах стресс-коррозия не наблюдается. Этот феномен объясняют существованием для всех сталей предела стресс-коррозии, который составляет примерно 0,7 от предела текучести металла трубы. Простые вычисления показывают, что на магистральных газопроводах уровень напряжений в стенке труб достигает и превышает предел стресс-коррозии. На нефтепроводах напряжения от внутреннего давления не достигают этого уровня. При уровне напряжений меньше предела стресс-коррозии атомарный водород не обладает такой проникающей способностью, чтобы за “время жизни” трубопровода стресс-коррозия успела заметно проявиться. Однако не следует думать, что на нефтепроводах появление стресс-коррозии исключено.

Всегда существуют участки, где имеет место концентрация напряжений. Такими участками в сварных соединениях являются места перехода от шва к основному металлу. Уровень напряжений в этих зонах от концентрации и сварочных напряжений при принятых на нефтепроводах давлениях может существенно превышать предел стресс-коррозии. Следовательно, в этих зонах может развиваться стресс-коррозия.

Для снижения явления стресс-коррозии успешным может быть применение новых изоляционных материалов, например, типа асмор. Оказалось, что некоторые полимеры этого типа обладают химической связью с железом и образуют тонкий дополнительный защитный слой, который не пропускает ионы водорода. Со временем этот защитный слой не ослабевает, как классические изоляционные пленки, а только усиливается, поскольку имеет химическую природу.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХРУПКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Н.Л. ЗАЙЦЕВ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

E-mail: koka.zaitceff@gmail.com

Для оценки сопротивляемости хрупким разрушениям сварных соединений с трещиноподобными дефектами применяют подходы линейной механики разрушения, базирующиеся на концепции Гриффитса. Согласно этой концепции условия, при которых будет происходить распространение трещины, произвольным образом расположенной в теле будет развиваться по направлению, вдоль которого интенсивность высвобождаемой энергии упругой деформации G^* максимальна и страгивание трещины произойдет в момент, когда величина этой энергии достигнет критического значения G_c .

Таким образом, условие разрушения запишем в виде:

$$G^* = G_c. \quad (1)$$

Применение критерия Гриффитса в форме (1) для трещин нормального разрыва не вызывает затруднения. В этом случае направление роста трещины совпадает с её начальным направлением, а критическое значение высвобождаемой в процессе разрушения энергии упругой деформации G_{1c} для плоской деформации определяется из выражения:

$$G_{1c} = \frac{1-\mu^2}{E} K_{1c}^2. \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости; K_{1c} – критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения).

В случае трещин смешанного типа раскрытия требуется вычисление интенсивности высвобождаемой энергии в направлении распространения трещины, не совпадающем с её начальным направлением. Эта задача в настоящее время не решена. Поэтому для определения значения номинального напряжения σ_n^* в момент разрушения и направления страгивания трещины в практических расчётах используют различные критерии локального разрушения (КЛР). Известны несколько таких критериев. Наиболее простым в вычислениях является σ_θ – критерий.

В работе [1] σ_θ – критерий сформулирован на основе обобщённого коэффициента интенсивности напряжений $K_\theta(\theta)$. Выражение для определения значения $K_\theta(\theta)$ записывают в виде:

$$K_\theta(\theta) = \frac{K_1}{4} \left(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} - 3\xi \left(\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right). \quad (3)$$

Соответственно, условие прочности записывают в виде:

$$K_\theta = K_1 F_0(\xi) \leq K_{1c}, \quad (4)$$

где $F_0(\xi)$ – функция, зависящая от отношения $\xi = K_\theta/K_1$. Она имеет вид:

$$F_0(\xi) = \cos^2 \frac{\theta_0}{2} \left(\cos \frac{\theta_0}{2} - 3\xi \sin \frac{\theta_0}{2} \right). \quad (5)$$

Величину разрушающего напряжения σ_n^* определяют из выражения:

$$\sigma_n^* = \frac{P^*}{F} = \frac{K_{1c}}{F_0(\xi)\sqrt{\pi a}}, \quad (6)$$

где P^* – разрушающая нагрузка; F – площадь поперечного сечения вдали от трещины; a – полудлина трещины.

Недостатком σ_θ – критерия является то, что сопротивляемость хрупкому разрушению образцов с трещинами, определённая экспериментально, оказывается большей, чем это следует из расчётов по σ_θ – критерию. Этому факту можно дать следующее объяснение. Запись σ_θ – критерия в форме (5) предполагает, что в момент начала разрушения размер и форма зоны пластической деформации перед вершиной трещины смешанного типа будут такими же, как перед трещиной нормального разрыва и, следовательно, количество

высвобождающейся упругой энергии потребное для страгивания и продвижения несимметричной трещины будет таким же, как в случае с трещиной нормального разрыва. Такое предположение не обосновано, так как при одинаковых значениях параметра K_I для несимметричной трещины и трещины нормального разрыва, размер пластической зоны в окрестности несимметричной трещины будет больше, чем для трещины нормального разрыва. В связи с этим выражение (7) следует записывать в виде:

$$K_{\theta} = K_I F_0(\xi) \leq K_{Ic} \cdot f(\xi), \quad (7)$$

где $f(\xi) > 1$ – безразмерная функция, учитывающая увеличение критического размера пластической зоны перед вершиной трещины с ростом $\xi = K_{II}/K_I$. При продвижении трещины на обеих сторонах поверхности разрушения образуется пластический слой толщиной S . Значение $f(\xi)$ найдём из сравнения толщин пластических слоёв для трещины нормального отрыва и трещины смешанного нагружения найдём

$$f(\xi) = [\sqrt{\xi^2 (1 + 3\cos^2\theta^*) + 2\xi \cdot \sin 2\theta^* + \sin^2\theta^*}] \quad (8)$$

Список литературы

1. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения/Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Т.А. ЗИМОГЛЯДОВА, А.С. ЕГОРОВА, В.С. ГУСЕВА

Научный руководитель: д.т.н., проф. А.А. БАТАЕВ
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: zimogliadovatiana@gmail.com

Самофлюсующиеся сплавы системы Ni-Cr-Si-B (основной элемент – никель) используются для восстановления изношенных участков и формирования функциональных защитных покрытий на поверхности инструмента, штампов горячего деформирования, валков прокатных станов, направляющих роликов, втулок центробежных насосов, муфт и т.д. Технологии формирования покрытий из самофлюсующихся сплавов условно можно разделить на две группы – наплавка и напыление. Способ наплавки релятивистским электронным лучом позволяет формировать упрочненный слой заведомо большей толщины за один проход (до 2 мм). Вывод высококонцентрированного электронного пучка в воздушную атмосферу снимает ограничения на габаритные размеры обрабатываемой детали, что также является весомым преимуществом данного способа формирования покрытий.

Одним из направлений исследований самофлюсующихся сплавов является введение в их матрицу соединений, улучшающих комплекс свойств композиционных покрытий. К таким структурным составляющим относят карбиды и бориды переходных металлов (TiC, WC, NbC, Cr₃C₂, TiB₂, VB и др.). Диборид ниобия NbB₂ отличается широкой областью гомогенности, высокая твердость, стойкость к окислению, коррозии и абразивному изнашиванию. Цель данной работы заключается в формировании функциональных композиционных покрытий на основе самофлюсующегося никелевого сплава с использованием технологии наплавки релятивистским пучком электронов, исследовании структурных особенностей и определении механических и триботехнических характеристик полученных материалов. Для формирования покрытий использовали промышленный самофлюсующийся сплав производства НПО «Тулачермет» марки ПН77Х15СЗР2 (77 % Ni, 15 % Cr, 3 % Si, 2 % B, 3 % Fe, ~0,1 % C) в сочетании с порошками ниобия (НбП-а) и аморфного бора. Количество порошковой смеси ниобия и бора подбирали таким образом, чтобы в процессе наплавки в покрытии формировался диборид ниобия NbB₂. Количество смеси «Nb-B» варьировали от 5 до 40 вес. %. Режимы наплавки были подобраны авторами на основании предварительных экспериментов. В качестве основного металла использовали низкоуглеродистую сталь 20.

В результате были сформированы композиционные материалы, толщина наплавленного слоя которых варьировалась 1,1 от до 1,5 мм. Крупных дефектов (пор, сквозных трещин, отслоений покрытия от основного металла и т.д.) не зафиксировано. Методами оптической металлографии и сканирующей электронной микроскопии установлено, что для всех наплавленных слоев характерна литая структура. Основной структурной составляющей является γ -твердый раствор (Ni, Fe). Известно, что никель с железом образуют твердый раствор замещения и могут взаимно растворяться друг в друге до 70 %. Оценка степени разбавления показала, что доля железа, перешедшего в наплавленный слой из основы в покрытие в процессе наплавки достигает 50 %. Помимо γ -(Ni-Fe) в наплавленных слоях выявлено наличие ряда упрочняющих соединений, а именно: Fe₂B, Cr₂₃C₆, NbC, Nb₆C₅, NbB₂. Размер твердых включений, химический состав и стехиометрия отличаются в зависимости от количества порошков ниобия и бора в насыпке. Было установлено, что в образцах с 30, 35 и 40 % смеси «Nb-B» карбид ниобия NbC выделяется первым из расплава (температура образования NbC ~ 3500 °C) и является центром кристаллизации, значительно измельчая структуру покрытий. Рост фазы NbC происходит до тех пор, пока температурно-временные условия не станут благоприятными для кристаллизации NbB₂ (температура образования NbB₂ ~ 3000 °C).

Анализ дюрометрических и триботехнических испытаний, реализуемых в различных условиях изнашивания, показал, что увеличение добавки «Nb-B» в порошковой смеси оказывает положительное влияние на комплекс свойств полученных материалов. Наивысшей износостойкостью обладает покрытие, полученное электронно-лучевой наплавкой смеси «NiCrSiB-сплав + 35 % (Nb-B)». Уровень его износостойкости в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных (ГОСТ 23.208-79) частиц в 5,7 раз превышает износостойкость эталонного образца (отожженная сталь 45). Таким образом, в работе подтверждается, что технология наплавки релятивистским пучком электронов позволяет эффективно упрочнять поверхностные слои стальных заготовок.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

О ПЛАНОВО-ВЫСОТНОМ ПОЛОЖЕНИИ ППМГ «ХАТАССЫ-ПАВЛОВСК» ЧЕРЕЗ Р. ЛЕНА И ВЛИЯНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Д.С. ИВАНОВ, Г.С. АММОСОВ, З.Г. КОРНИЛОВА

ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Email: zoia_korn@mail.ru

Проблемы обеспечения эксплуатационной надежности подводных переходов магистральных газопроводов (ППМГ) имеют особую значимость, поскольку отказы и аварии на них по своим экономическим и экологическим последствиям значительно превосходят аналогичные происшествия на линейной части. Многие эксплуатируемые подводные переходы в стране возведены открытым способом с укладкой в подводную траншею (в единичных случаях – по дну).

Подводные переходы магистральных газопроводов в русловой части подвергаются размыву, вплоть до обнажения и провисания, воздействию меандрирования реки [1].

Цель работы – исследование состояния подводного перехода магистрального газопровода «Хатассы-Павловск» через р. Лена. Первая нитка ППМГ «Хатассы-Павловск» через р. Лена, протяженностью 16,96 км, была проложена в сентябре 2003 года. Через три года 26 сентября 2006 г. произошла утечка газа на ППМГ, 27 августа 2007 г. произошла вторая авария на этом же ППМГ. За шесть лет (с 2003 по 2009 год) эксплуатации I-й нитки ППМГ через р. Лена возникло четыре «инцидента», три в русловом участке, один на пойменном участке данного магистрального газопровода [2]. Вторая нитка ППМГ «Хатассы-Павловск» через р. Лена, протяженностью 16,26 км, проложена в апреле 2009 года. Обе нитки проложены между гидропостом (г/п) с. Табага и г. Якутском.

В статье приводятся данные о проведении мониторинговых исследований состояния ППМГ «Хатассы-Павловск» через р. Лена в русловой части реки, определение планово-высотных положений двух ниток газопровода на пойменных участках трассы, о русловых процессах, влияющие на НДС сварных соединений стыков труб и эксплуатационную надежность и долговечность.

Материалы и методы исследования

В связи с интенсивным развитием размыва дна реки у правого берега р. Лена у островов Бэргэһэ Үөс и Үөс Кумах нами произведено обследование георадаром «ОКО-2М» положения дюкеров двух ниток ППМГ в районе прорытого канала между этими островами для выхода газопровода к острову Манастыыр и Хаптагайской протоке. Например, в результате измерений 28 августа – 07 сентября 2014 г. нами обнаружен провисающий участок дюкера II-й нитки. При этом протяженность провисающего участка равна примерно $25 \div 30$ м. Здесь от поверхности воды верхняя образующая газопровода находится на глубине $\sim 4,6$ м, а высота нижней образующей газопровода от дна реки равна $\sim 1,6$ м. Если смотреть по направлению перекачки газа, то наблюдается интенсивный размыв правого берега прорытого канала. С обеих сторон данного участка две нитки газопровода покрыты слоем донных отложений и расположены примерно на одинаковой глубине от 1,5 до 2,0 м, соответственно, от поверхности дна при глубине воды $\sim 4,0 \div 5,0$ м. При обследовании ППМГ через р. Лена гидролокатором ГБО «Гидра 500Э» четко обнаруживаются оголенные места дюкера [3].

Результаты

Полученные нами результаты позволили установить, что размыв и оголение дюкера с 2004 по 2019 годы имеют постоянный характер; длина оголенных и провисающих участков дюкеров вдоль створа из года в год меняется, а также меняются координаты этих участков; на размывтых и провисающих участках дюкера характер донного наноса преобладает ниже положения дюкера по течению реки из-за размыва донных наносов под дюкером и постоянного увеличения высоты его провисания. Показано, что комплексное приборное обследование состояния ППМГ позволяет обнаруживать не только оголенность дюкера, но и высоту его провисания.

Обсуждение

Руслловые процессы при траншейном методе строительства и сам подводный переход влияют друг на друга [4], это приводит к опасным размывам ППМГ, что обусловлено следующими факторами: естественные переформирования русла и берегов; антропогенные факторы: недоучет на стадии проектирования влияния русловых процессов, ошибки в выборе мест пересечения водной преграды и расчете величины заглубления, преобразование русла и берегов во время строительства или реконструкции переходов и др.

Ложе реки Лена сложено песчаными грунтами, поэтому подвергается сильной деформации. Морфология русла р. Лена на участке Табага-Кангалассы очень динамична, так как русло р. Лены на этом участке относится к слабоустойчивому или неустойчивому типу. Одним из серьезных гидрологических процессов по течению реки Лена является смещение массивов подвижных песков, значительно влияющих на характер ледохода и весенние паводки. Проблема прогнозирования характеристик водного потока в условиях заторообразования остается актуальной. В работах [5, 6] выявлены основные факторы, определяющие максимальные уровни воды выше и ниже по течению от места формирования затора.

Выводы

Приборным обследованием состояний двух ниток ППМГ на пойменных участках трассы выявлены наиболее опасные, постоянно развивающиеся участки прогибов и просадки газопровода, связанные с морозными пучениями и термопросадкой на термокарстовом участке, а также гидрологическими и гидроморфологическими процессами.

Динамика размыва и оголения дюкера ППМГ через р. Лена показывает, что, несмотря на проводимые превентивные мероприятия по его заглублению и подсадке, размыв и оголение дюкера продолжают на участке от ПК 85+00 до ПК 93+00 (протяженностью 800 м), а плано-высотное положение дюкера выше проектного примерно на 3,9 м.

В результате размыва донных отложений и пучения грунта на береговых склонах проток, находящихся у правого и левого берегов реки, а также береговых склонах островов подводные переходы газопровода полностью схватываются промерзающими льдами и грунтами береговых склонов и жестко защемляются.

Список литературы

1. Шалагин В.Н., Бриллиантов А.Н. Особенности диагностического обслуживания ППМГ // Газовая промышленность. – 2005. – № 10. – С. 16-20.
2. Аммосов А.П., Корнилова З.Г. О строительстве подводных переходов магистральных трубопроводов. Аналитический обзор. / Якутск, 2008. Изд-во ЯГУ. 58 с.
3. Аммосов А.П., Яковлев Ю.А., Ильин Г.Ю., Корнилова З.Г. Особенности изменения положения ППМГ «Хатассы-Павловск» через р. Лена и разрушения по сварным соединениям стыков труб дюкера // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5 – С. 44-49.
4. Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Шаталов Д.А., Вафин Д.Р.. Выбор метода строительства подводных переходов магистральных трубопроводов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 11. – С. 143-148.
5. Кусатов К.И., Аммосов А.П., Корнилова З.Г., Шпакова Р.Н. Антропогенный фактор в заторообразовании и весеннем наводнении при ледоходе на р. Лена. // Метеорология и гидрология - 2012. – № 6 – С. 54-60. DOI:10.3103/S1068373912060064.
6. Аммосов А.П., Шпакова Р.Н., Кусатов К.И., Корнилова З.Г. Изменение уровней воды и уклонов водной поверхности при заторных явлениях на р. Лене // Известия Иркутского госуд. университета, Серия Науки о Земле. – 2019. – Т. 28. – С. 3-20. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.28.3>.

ИННОВАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

М.А. ИВАНОВ, А.К. ТИНЬГАЕВ, А.Г. АЛЪРУХАЙМИ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

E-mail: ivanovma@susu.ru

Перспективы применения современных низколегированных высокопрочных сталей с пределом текучести до 960 МПа в судостроении связывают с развитием морской техники арктического класса, предназначенной для эксплуатации в экстремальных природно-климатических условиях холодного климата. Успех применения этих материалов для судокорпусных конструкций в значительной мере зависит от их свариваемости, поскольку основным способом соединений их элементов является сварка.

При оценке свариваемости стали традиционно анализируют реакцию основного и наплавленного металла на термический цикл сварки, которая должна соответствовать, с одной стороны, техническим требованиям в отношении металла сварного соединения (задача по обеспечению технологической прочности), а с другой стороны – в отношении соединяемых элементов и конструкции в целом (задача по обеспечению конструктивной прочности).

Обеспечение технологической прочности сварных соединений, свариваемых в условиях открытого стапеля связывают с сопротивлением образованию холодных трещин, возникновение которые зависят от наличия закалочных структур мартенситного и бейнитного типов, высокого уровня растягивающих остаточных напряжений и насыщенности сварного соединения диффузионным водородом.

Обеспечение конструктивной прочности сварных соединений, особенно в условиях циклического нагружения, связывают с высокой чувствительностью металла сварного соединения к различным видам технологических дефектов (подрезам, непроварам, несплавлениям и др.).

Существующая концепция проектирования сварных соединений судокорпусных конструкций основывается на принципе равнопрочности основного и наплавленного металла, который используется в нормативных документах судостроительной международной ассоциации классификационных обществ. Практика реализации этой концепции в отношении высокопрочных сталей свидетельствует о том, что в большинстве случаев этого приводит к усложнению технологии сварки, необходимости использования дорогостоящих сварочных материалов, и при этом не гарантирует отсутствие трещин в сварных соединениях.

Для успешного решения этих задач считаем, что принцип равнопрочности основного и наплавленного металла на уровне технологической прочности соединения может быть не соблюден при условии, что на уровне конструктивной прочности изделия в целом работоспособность сварного соединения обеспечена.

Задачу по обеспечению конструктивной прочности сварных соединений с мягкими угловыми швами решается двумя путями: в первом случае за счет увеличения катета наплавленного металла, а во втором – за счет оптимизации его геометрии с учетом особенностей распределения силового потока, а также применения комбинированных швов, в которых корень выполнен мягким валиком, а заполняющие проходы проволокой равнопрочной основному металлу.

Возможность обеспечения равнопрочности для стыковых сварных соединений с мягкими и комбинированными швами зависит от типа разделки, степени механической неоднородности и в полном объеме для подавляющего большинства случаев не достижима. Вместе с тем для отдельных групп связей корпуса судна, где определяющим, например, является не прочность, а жесткость они могут быть успешно применимы.

Данная концепция была частично апробирована при выполнении работы для Российского морского регистра судоходства по разработке предложений по корректировке требований нормативных документов к выбору сварочных материалов и технологическим

процессам сварки корпусных конструкций, изготовленных из высокопрочной стали. В ходе выполнения работы было показано, что использование мягких швов для тавровых сварных соединений высокопрочных сталей позволяет:

- гарантировано обеспечить сопротивляемость образованию холодных трещин сварных соединений;

- повысить до 40% долговечность сварного соединения при циклическом нагружении и до 20% запас прочности хрупкому разрушению.

В продолжение работы предполагается разработать типовые схемы выполнения сварных соединений судокорпусных конструкций из высокопрочных сталей с мягкими и комбинированными швами, а также методы их расчета на прочность и долговечность.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННОЙ БРОНЗЫ С ЛЕГКОПЛАВКОЙ ФАЗОЙ

Н.В. ИВАНОВ, Р.Ю. ПЕТРОВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: ivanov@tpu.ru

В промышленности бронзы с высоким содержанием свинца применяются, как правило, для изготовления деталей, работающих на износ, и от них не требуется высоких механических свойств [1]. Но существует группа изделий из бронзы, например уплотнения и поршневые кольца компрессоров высокого давления, работающих на износ в условиях циклических нагрузок. В производственной практике они выходят из строя, из-за разрушения [2]. Свинец повышает триботехнические свойства таких бронз. Не растворяясь в меди при низких температурах, свинец образует включения в медной матрице, как правило, имеющие неправильную форму с рваной межфазной поверхностью. Обладая очень низкими прочностными характеристиками, эти включения становятся концентраторами напряжения. Исходя из этого, одним из эффективных способов повышения прочностных характеристик таких бронз является изменение формы свинцовых включений (по аналогии с графитом в чугунах). Для формирования определенной морфологии свинцовых включений отливки охлаждаются с определенными скоростями. Низкие скорости охлаждения приводят к сфероидизации свинцовых включений, высокие к получению вытянутой формы включений с рваной, неровной поверхностью [3].

Таблица 1. Параметры микроструктуры бронзы БрС10 полученной с различными скоростями охлаждения

Скорость охлаждения	Расстояние между осями второго порядка дендритов меди, мкм	Балл зерна/средний диаметр зерна, мм
158	12	2/-
137	14	1/-
43	16	-/0,3 мм
25	25	-/0,5-0,6 мм
10	33	-/0,8-1,2 мм
0,15	120	-/2-3 мм

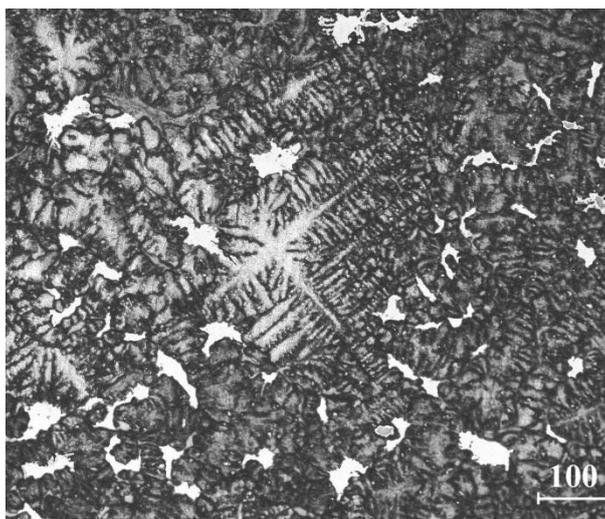


Рисунок 1 – Микроструктура бронзы БрС10

Список литературы

1. Золоторевский В. С., Механические свойства металлов: учебник для вузов. – М.: МИСиС, 1998. – 400 с.
2. Гордеева Т. А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. — М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.

3. Корчмит А. В., Егоров Ю.П. Методика определения скорости охлаждения бронзы Бр. ОСЦН 10-13-2-2 в формах с разной теплопроводностью // Обработка металлов. – 2005. – № 1. – С.23-25.

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛИ И СПЛАВОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Г. ИГНАТОВ

ООО «ЛазерИнформСервис», С.-Петербург
E-mail: laseris-spbo@yandex.ru, www.laseris.ru

Продажи лазеров за десятилетие удвоились, достигнув 13,76 млрд долл. в 2018 году. В 2019 году их объём продаж ожидается ~14,6 млрд долл. [1,2]. Объем продаж промышленных лазеров составил в 2018 году ~5,1 [1-4] млрд долл. В 2019 г. ожидается их рост на 4% (как в 2018 г.) Лидером продаж останутся мощные волоконные лазеры (ВЛ) для сварки и резки металла, которые в 2018 году заняли более 50% рынка промышленных лазеров. ВЛ стали экономически более эффективной альтернативой мощным CO₂-лазерам [1,2]. Твердотельные лазеры, в т.ч. мощные дисковые, а также диодные и эксимерные, были на 2-м и 3-м месте. Твердотельные лазеры Ultrashort-pulse (USP), УФ- и фемтосекундные лазеры пользовались повышенным спросом в 2018 г., рост их продаж продолжится и в 2019 г. [2,4].

Мировой рынок лазеров для макрообработки в 2018 году составил 2789 млн долл. и в 2019 г. должен достигнуть 2906 млн долл. (см.рис.1а), при этом, **сварка и наплавка занимала 13% рынка, а лидером была лазерная резка с 41%**, см. рис. 1б [2, 4].



Рисунок 1 - Рынок промышленных лазеров (по направлениям применения) в 2017-2018 г. и прогноз на 2019 г., млн долл., источник: Strategies Unlimited – а [2, 4].

Распределение продаж промышленных лазеров по видам их применения в 2018 г. – б [2, 4].

Мировой рынок лазерных систем для обработки материалов в 2018 году составил 19,8 млрд долл., при росте в 17%. [3]. Обычно сами лазеры в лазерных системах/комплексах занимают 30-50% структуры цены.

Лазерная сварка обладает высокой производительностью и степенью автоматизации, высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, благодаря чему с успехом применяется в автомобиле- и судостроении, в атомной и химической, в аэрокосмической и нефтегазовой промышленности, в машиностроении [5-13], см. рис. 2.

Для лазерной сварки с качественным сквозным проплавлением необходимо 0,5, а чаще – до 1 кВт лучевой мощности на 1 мм толщины провариваемой стали/сплава [5, 11-13].

В лазерной сварке идёт активное вытеснение CO₂-лазеров (до 30 кВт) «волоконниками» IPG и других производителей (до 30/100 кВт), а также начинают применяться мощные диодные лазеры Laserline (до 30-60 кВт). Сильные позиции в мировом массовом производстве имеют автоматизированные комплексы на базе дисковых лазеров (до 16/32 кВт) немецкой фирмы «TRUMPF» [1,2].

На судостроительной верфи Meyer Werft (Papenburg, Germany) в ближайшие годы планируется внедрение лазерной сварки стальных листов толщиной до 30 мм 60 кВт-м диодным лазером немецкой компании Laserline. В 2020 году финской фирмой PEMA запланировано внедрить гибридную сварку тонколистовых панелей на судостроительной итальянской верфи FINCANTIERI [14]. ЦТСС (Россия, СПб) разработала технологию и планирует внедрить в отечественном судостроении порталную крупногабаритную установку для лазерной сварки листовых полотнищ и судовых наборов с рёбрами жёсткости [7]. ГАЗПРОМ несколько лет разрабатывает технологию гибридной лазерной сварки

мощными волоконными лазерами неповоротных стыков труб большого диаметра в полевых условиях [12].

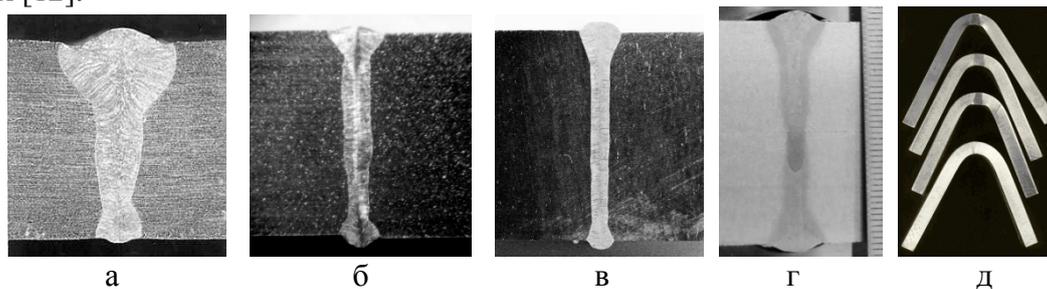


Рисунок 2 - Макрошлифы, выполненные: 15 кВт-м CO₂-лазером «Ижора-М (сталь 08X18H10T, $\delta = 10$ мм, P = 10 кВт, V_{св} = 12 мм/с, гелий)» - а [5], 15 кВт-м волоконным лазером НТО «ИРЭ-Полус», сталь 316L, $\delta = 7$ мм – б, сталь ХМ-19, $\delta = 10$ мм – в [6] в НИИЭФА им.Д.В.Ефремова (СПб) и 2-х проходной гибридной сваркой (толщиной 40 мм, представленный НТО «ИРЭ-Полус» на выставке «Металлообработка-2014») - г [7]. Образцы из стали разных классов после испытания на статический изгиб – д [9].

Затрудняют применение лазерной сварки: высокая стоимость оборудования (~50 тыс.долл. / кВт мощности), высокие требования к подготовке заготовок и сборок под сварку, в т.ч. для минимизации зазора, а также вопросы аттестации и сертификации [15].

С целью повышения качества лазерной сварки, расширения её областей применения ведутся интенсивные исследовательские работы по разработке технологий лазерной гибридной сварки, со сканированием, а также многопроходной сварки [12,13]. Для сварки меди и др.цветных металлов начинают применять синие и зелёные лазеры P = 0,5-1 кВт [2].

Список литературы

1. What goes up ANNUAL LASER MARKET REVIEW & FORECAST 2019 / G.OVERTON, A.NOGEЕ, D.BELFORTE, J.WALLACE, B.GEFVERT // Laser Focus World, January 2019. – P. 40-45, 47, 49-54, 56-58, 60-61, 64-65, www.laserfocusworld.com.
2. Буров Н.В., Игнатов А.Г. Мировой рынок фотоники и лазерных технологий: 2010-2019 // Ритм машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 60-67.
3. Мировой рынок систем лазерной обработки материалов достиг рекордных \$ 19,8 млрд / <https://www.lasersystemseurope.com/> 11/04/2019.
4. BELFORTE DAVID A. 2018 was another record year, contending with turmoil // Industrial Laser Solutions, 2019, JANUARY/FEBRUARY. P. 9–11. www.industrial-lasers.com.
5. Лазерная сварка со сквозным проплавлением сталей различных классов // А.Г. Игнатов, А.В. Козлов, А.И. Скрипченко и др. // Автоматическая сварка. – 1987. – М 9. – С. 26-29.
6. Лазерная сварка для термоядерной энергетики / А.Г. Игнатов, А.Н. Маханьков, С.Н. Мазаев и др. // Ритм машиностроения. – 2016. – № 6. – С. 20-25.
7. Игнатов А.Г. Российские лазерные технологии: состояние и перспективы применения // Ритм машиностроения. – 2016. – №1. – С. 26-40.
8. Игнатов А.Г. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами. Часть 1. Особенности лазерной сварки // Фотоника. – 2008. – № 6. – С. 10-17. URL. <http://www.photonics.su/journal/2008/6>.
9. Игнатов А.Г. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами. Часть 2. Свойства сварных соединений // Фотоника. – 2009. – № 3. – С. 22-24. URL. <http://www.photonics.su/journal/2009/3>.
10. Игнатов А.Г. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами. Часть 3. Дефекты сварных соединений // Фотоника. – 2009. – № 4. – С. 12-16. URL. <http://www.photonics.su/journal/2009/4>.
11. Игнатов А.Г. Особенности сварки волоконными лазерами // Ритм машиностроения. – 2017. – № 3. – С. 20-25. URL: www.laseris.ru.

12. Грезев Н.В., Шамов Е.М., Маркушов Ю.В. Сварка волоконными лазерами // Ритм машиностроения. – 2016. – № 7. – С. 38-44.
13. Справочник по лазерной сварке / под ред. С. Катаяма. – М.: Техносфера, 2015. - 704 с.
14. Italian shipbuilder places large order for laser welding... / Industrial Laser Solutions. – 2019. – N 7-8. – P. 6.
15. Буров Н.В., Игнатов А.Г. Рынок лазеров в России и странах СНГ // Ритм машиностроения. – 2019. – №5. – С. 32-43. // URL: <https://ritm-magazine.ru/ru/magazines/2019/N5>.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ФОРМЫ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И СВОЙСТВ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ВЫПОЛНЕННОГО СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А.Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, А.А. РАДЧЕНКО, Д.В. БУБЕН, А.И. ШЕВЦОВ

Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» обособленное хозяйственное структурное подразделение «Институт сварки и защитных покрытий», г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: bubenweld@outlook.com

Относительно новым способом получения неразъемного соединения по праву можно считать сварку трением с перемешиванием (СТП). Самым важным преимуществом СТП по сравнению с традиционными методами сварки можно считать отсутствие образования жидкой фазы и дефектов, связанных с охлаждением расплава. Метод СТП позволяет получать высококачественные соединения в конструкциях различных форм и размеров. Данный способ сварки может использоваться как альтернатива традиционным видам сварки, так как обладает широкими технологическими возможностями. В связи с этим, СТП является перспективным видом сварки для различных отраслей промышленности.

Получить бездефектное соединений при СТП возможно только при определенных параметрах процесса. К основным конструктивно-технологическим параметрам СТП относят: форму инструмента (диаметр и длина заплечника, пина), форма поверхности пина и заплечника), скорость сварки, скорость вращения инструмента, направление вращения инструмента, эксцентриситет оси вращения инструмента, глубина погружения инструмента, скорость погружения инструмента, время выдержки после заглубления инструмента, угол наклона инструмента.

Конфигурация геометрии инструмента играет важную роль в управлении параметрами СТП, формировании механических свойств сварного соединения, однако невозможно установить однозначной и простой зависимости. Параметры обработки выбираются (оптимизируются) для обеспечения адекватных термо-механических условий сварки, обеспечивающих получение бездефектного сварного шва с требуемыми геометрическими и механическими свойствами.

Для получения информации о формировании геометрии и свойств сварного соединения, были проведены исследования по СТП на разнородных алюминиевых сплавах нахлесточных соединений.

В данной работе были проведены исследования по изучению влияния параметров процесса сварки и геометрии инструмента на микроструктуру и механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов Д16, EN AW-6005A T6 полученных сваркой трением с перемешиванием. Были испытаны разные типы геометрии заплечников и пинов, при различных параметрах сварки.

В результате работы было изучено влияние геометрии и механических свойств сварных соединений, от выбранных режимов сварки и формы рабочего инструмента.

ОРБИТАЛЬНАЯ СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ В ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В.Ю. ИЛЮШКИН

ФГУП "НПО" ТЕХНОМАШ", г. Москва

E-mail: info@tmnpo.ru

Современный подход к созданию космических аппаратов с использованием двигателей на жидком топливе и теплообменных систем невозможен без применения многочисленных сетей трубопроводов различного диаметра и назначения, выполненных из разных материалов. Основным методом получения неразъемных соединений трубопроводов является дуговая сварка в защитных газах. Так, например, некоторые космических комплексы насчитывают до 20 000 стыков трубопроводов из алюминиевых сплавов и сталей. Поэтому требования качества и надежности, предъявляемые к таким комплексам, в полной мере относятся и к сварным соединениям трубопроводов.

Многолетний опыт показывает, что применение ручной сварки сопряжено с нестабильностью качества сварных соединений, что особенно недопустимо в условиях агрегатной и общей сборки комплексов и их частей из-за ограничений контролепригодности соединений.

Высокоэффективным методом получения качественных неразъемных соединений в монтажных условиях является автоматическая орбитальная сварка трубопроводов.

В 60-80-ые годы прошлого столетия в отрасли для создания аэрокосмических комплексов был разработан, изготовлен и широко внедрен на предприятиях параметрический ряд сварочных головок, состоящий из более 30 типоразмеров головок серий АНС, ГНС, ГНСА, ГСМ и др. для автоматической орбитальной сварки трубопроводов, включая аппаратуру управления и сварочные источники.

Однако к началу XXI века элементная база и конструкция сварочных головок, разработанных ранее, морально устарела и имела ряд существенных недостатков.

Эти факторы привели к необходимости разработки новых поколений сварочных головок и аппаратуры управления автоматической сваркой с использованием современных средств и методов разработки, новых материалов и технологии для удовлетворения потребностей отечественной ракетно-космической отрасли в области орбитальной сварки трубопроводных систем.

С начала 2000-х годов до настоящего времени разработаны новые современные сварочные головки различных типов и аппаратура управления для сварки трубопроводов из алюминиевых и высокопрочных стальных трубопроводов диаметром от 3 до 560 мм, которые внедрены и успешно работают на предприятиях отрасли.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ МЕТОДОМ

К.Н. КАЛАШНИКОВ, А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, В. УТЯГАНОВА, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: tch7av@gmail.com

Известно, что титановые сплавы являются одними из наиболее часто применяемых конструкционных материалов в авиационной, транспортной и космической отраслях промышленности. За счет их малой плотности и высокой прочности их применяют для изготовления таких деталей, как шар-баллоны высокого давления и танк-контейнеры для перевозки горючих жидкостей. Однако применение таких материалов затрудняет высокая стоимость изготовления и большие затраты материала. Это связано с тем, что в большей степени изготовление производится посредством механической обработки, когда деталь вытачивается из объемной заготовки. С экономической точки зрения альтернативным способом получения деталей из титановых сплавов являются методы аддитивного производства. Наиболее перспективным и, при этом, малоизученным представителем семейства аддитивных технологий является метод электронно-лучевого проволочного производства. Он позволяет максимально снизить потребность в постобработке и, следовательно, значительно снизить затраты материала. Однако, для того чтобы получить качественное изделие, необходимо точно определить окно допустимых параметров процесса изготовления, поскольку свойства конечного продукта будут зависеть от структуры, сформированной в процессе кристаллизации материала. Основой вклад в этот процесс вносят такие технологические параметры, как ускоряющее напряжение электронно-лучевой пушки, ток электронного пучка, а также тип и размер развертки пучка. В данной работе было исследовано влияние тока электронного пучка на структуру и свойства полученных образцов. Для этого были получены 2 образца из сплава ВТ6 в форме стенок при различных параметрах тока пучка (42 мА и 35 мА на первом слое), но одинаковых ускоряющем напряжении, типе развертки, скорости подачи проволоки и высоте слоя. В процессе печати с каждым слоем ток пучка уменьшался до достижения 31 мА на последнем слое для каждого из образцов.

В результате эксперимента было выявлено, что процесс формирования носит различный характер. В случае с образцом, полученным при токе 35 мА на первом слое, процесс формирования слоя носит струйный характер. Толщина стенки при этом составляет 5,9 мм и незначительно превышает размеры ванны расплава, ограниченной разверткой электронного пучка диаметром 5,5 мм. Что касается образца, полученного при токе 42 мА, то при достижении высоты стенки порядка 10 мм струйный характер формирования слоя сменился капельным. Ширина стенки в данном случае составила 6,3 – 7,9 мм, что свидетельствует о перегреве материала. При изучении структуры образцов были выявлены объемные дефекты в виде пор. В образце, полученном при меньших токах поры сконцентрированы на краях стенки в связи с тем, что данные участки подвержены многократному перегреву из-за разнонаправленного режима печати. В случае же образца, полученного при больших токах, помимо пор на концах стенки встречаются и поры в центре стенки, а наличие таких дефектов в основном объеме детали является крайне нежелательным. Исследование механических характеристик показало, что предел прочности образца, полученного при больших токах, при растяжении поперек слоев (950 МПа) превышает предел прочности образца, полученного при меньших токах (878 МПа).

Таким образом, повышение тока электронного пучка при электронно-лучевой печати проволокой из сплава ВТ6 приводит к появлению объемных дефектов в виде пор в основной части изделия, но при этом более высокие, хоть и незначительно, механические характеристики.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.

FRICION STIR WELDING OF Al-Mg-Si SHEETS BY TOOL WITH SEMI-SPHERICAL PIN

KALINENKO A., VYSOTSKIY I., MALOPHEYEV S., MIRONOV S., KAIBYSHEV R.

Belgorod State University, Belgorod
E-mail: malofeev@bsu.edu.ru

A new design for the friction-stir welding (FSW) tool was used for joined Al-Mg-Mn-Zr alloy. The newly developed tool included a conventional concave-shaped shoulder and a semi-spherical pin. The semi-spherical geometry of the tool pin is simple to produce a FSW tool of tungsten carbide. The feasibility of the new tool design as well as its effect on microstructure and properties of the produced welds were for studied.

This work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the agreement №14.584.21.0023 (ID number RFMEFI58417X0023). The authors are grateful to the staff of the Joint Research Center, «Technology and Materials» Belgorod State National Research University for their assistance with the mechanical and structural characterizations.

TENSILE BEHAVIOR OF FRICTION-STIR WELDED Al-Mg-Si ALLOY

KALINENKO A., I. VYSOTSKIY, S. MALOPHEYEV, S. MIRONOV, R. KAIBYSHEV

Belgorod State University, Belgorod
E-mail: malofeev@bsu.edu.ru

In this work, digital-image-correlation technique was applied to examine an evolution of strain distribution during transverse tensile tests of friction-stir welded (FSW) Al-Mg-Si alloy. Due to sharp thermal- as well as strain gradients inherent to FSW process, the microstructure distribution within the welds is usually heterogeneous and thus the mechanical response is expected to be not uniform. Indeed, the tensile strain was found to preferentially concentrate in heat-affected zone, presumably due coarsening of strengthening precipitates in this microstructural region and the concomitant material softening. With subsequent tensile deformation, however, the strain also expanded to a relatively hard stir zone and this observation was attributed to a work hardening effect. Nevertheless, the tensile strain was shown to have highly localized character and this resulted in premature failure of the welds.

This work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the agreement №14.584.21.0023 (ID number RFMEFI58417X0023). The authors are grateful to the staff of the Joint Research Center, «Technology and Materials» Belgorod State National Research University for their assistance with the mechanical and structural characterizations.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РОСТА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ПРОСЛОЕК В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

А.Е. КАРМАНОВА, А.В. ГИРШ, И.Д. КУЧУМОВА, Т.С. ОГНЕВА

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

E-mail: pandorra.06@mail.ru

В настоящее время со стороны научного сообщества повышенное внимание уделяется металл-интерметаллидным материалам на основе никеля и алюминия, что обусловлено благоприятными свойствами алюминидов никеля, а именно высокими значениями их модуля упругости и твердости, низкой плотностью, повышенной жаропрочностью, а также высоким уровнем износостойкости и стойкостью к окислению. Сварка взрывом с последующим отжигом является одним из эффективных способов формирования композитов, состоящих из разнородных материалов, а формирование интерметаллидных прослоек после отжига на границах соединения металлов позволяет существенно снизить вероятность внезапного разрушения, и добиться высокого уровня надёжности и долговечности материала [1-3].

Цель настоящей работы заключается в выявлении механизмов формирования соединений между никелем и алюминием и роста интерметаллидных слоёв при сварке взрывом.

Сварка взрывом осуществлялась по схеме с параллельным расположением пластин, композит формировался из 4 пластин никеля толщиной 1 мм и 3 пластин алюминия толщиной 0,5 мм. В качестве взрывчатого вещества использовался аммонит 6ЖВ.

В ходе структурных исследований было установлено, что на границах соединения пластин никеля и алюминия в процессе сварки взрывом формируются зоны перемешивания материалов, которые состоят из неравномерно распределённых включений. Высокодисперсные включения зон перемешивания отличаются дендритным строением, что свидетельствует об охлаждении этих микрообъемов из жидкого состояния.

Методом анализа картин дифракции электронов в зонах перемешивания были зафиксированы как стабильные интерметаллидные фазы $NiAl_3$, $NiAl$ так и метастабильные - соединения Ni_2Al_9 и квазикристаллическая декагональная фаза. В декагональной фазе плоскость с квазипериодическим расположением атомов имеет вращательную симметрию 10-го порядка. В плоскости, перпендикулярной к ней, наблюдается периодическое расположение атомов. Образование метастабильных фаз связано с чрезвычайно высокими скоростями охлаждения материалов в зонах перемешивания. Микротвердость в зонах перемешивания колеблется в диапазоне от 3500 до 7000 МПа, что также подтверждает факт формирования твердых интерметаллидных фаз различного состава.

С целью получения многослойных композитов с интерметаллидными прослойками работе проводился отжиг композитов, полученных методом сварки взрывом на первом этапе. Отжиг выполняли в воздушной атмосфере при температуре 550 °С. Длительность процесса варьировалась от 5 минут до 10 часов.

Исследование структуры на различных этапах отжига позволило наблюдать процессы зарождения и роста интерметаллидов на межслойных границах. Результаты рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что спустя пять минут отжига метастабильные соединения Ni_2Al_9 и квазикристаллическая фаза распадаются. В структуре материала присутствуют только интерметаллиды $NiAl_3$ и $NiAl$. Процесс образования фазы $NiAl_3$ сопровождается постепенным растворением включений в зоне перемешивания. В это же время со стороны никеля постепенно формируется стабильный слой фазы Ni_2Al_3 . Приблизительно после четырех часов отжига процесс гомогенизации завершается. Фаза $NiAl$ полностью растворяется, и в прослойке остаются только интерметаллиды $NiAl_3$ и Ni_2Al_3 .

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что сварка взрывом никеля и алюминия сопровождается формированием зон перемешивания, содержащих стабильные и метастабильные интерметаллидные фазы. Последующий отжиг

приводит к выравниванию химического и фазового состава и росту интерметаллидных прослоек $NiAl_3$ и Ni_2Al_3 .

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Грант Президента МК-5849.2018.3).

Список литературы

1. Explosively welded multilayer Ni–Al composites / Bataev I.A., Ogneva T.S., Bataev A.A., Mali V.I., Esikov M.A., Lazurenko D.V., Guo Y., Jorge Junior A. // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 88. – P. 1082-1087.
2. Лысак В.И. Сварка взрывом / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин // Москва: Машиностроение, 2005. – С. 490.
3. Crossland B. Explosive welding of metals and its application / B. Crossland // Oxford: University Press, 1982. – 242 p.

ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ АРС КЛАССА

И.Г. КАРПОВ, П.В. МЕЛЬНИКОВ, Д.А. КАЩЕНКО

НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург
E-mail: ilyagarpov@gmail.com

С позиции науки создание металлических конструкционных материалов, в том числе сварочных, обеспечивающих высокую надежность сварных соединений при экстремально жестких условиях эксплуатации, является серьезной задачей. К настоящему времени существует огромная номенклатура хладостойких сварочных материалов, как в отечественной промышленности, так и за рубежом. Однако исследования, проведенные за последние годы международным научным сообществом (материалы международных конференций ISOPE; результаты, полученные в рамках международной программы «Материалы для Арктики») показали, что применимость разработанных сварочных материалов, как отечественных, так и иностранных, по общепринятым критериям предотвращения хрупких разрушений при отрицательных температурах испытаний не подтверждается. Необходимы новые подходы к созданию, испытаниям и аттестации хладостойких сварочных материалов для обеспечения гарантированной эксплуатационной надежности сварных конструкций, работающих в условиях Крайнего севера.

Специалистами в области прочности сварных конструкций была выделена проблематика и сформированы основные требования к конструкционным сталям и их соединениям работающих в условиях Арктики и Крайнего Севера [1-4]. Новейшие требования вошли в Правила РМРС по постройке судов и буровых платформ ледовых классов как дополнительная категория материалов с индексом Arc. Данный индекс присваивается материалам, успешно прошедшим дополнительный комплекс испытаний, таких как определение температуры вязко-хрупкого перехода по различным методикам (Ткб, NDT, DWTT) и определение параметров трещиностойкости (CTOD) основного металла и различных зон сварных соединений. В настоящее время в отношении стального проката проблема обеспечения заданных характеристик достаточно успешно решена. Уникальный комплекс свойств такого металла удастся получить за счет применения прецизионных режимов термомеханической обработки (ТМО) которая позволяет получить ультрамелкозернистую гомогенную микроструктуру по всей толщине листа тем самым обеспечивая при сохранении высокой прочности высокие пластические характеристики, удовлетворительную трещиностойкость и необходимую вязкость разрушения. В отношении сварочных материалов и сварных соединений такая технология модифицирования структурных составляющих, типа ТМО, объективно не применима. В результате исследовательских работ в области применения действующих технологий сварки и разработанных хладостойких сварочных материалов для сварки сталей класса Arc оказалось, что большинство сварочных процессов не позволяет обеспечить новые требования к материалам для применения в Арктических условиях. В связи с чем НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» ведет активную работу по созданию нового поколения хладостойких сварочных материалов и эффективных технологий сварки.

Коллективом института отрабатываются технологии позволяющие улучшать характеристики хладостойкости наплавленного металла за счет применения микролегирования и различных модифицирующих микродобавок. При этом микролегирование осуществляется как при помощи специального присадочного материала (уже содержащего легирующие добавки), так и через шихтовые материалы покрытых электродов, порошковых проволок и агломерированных флюсов. Таким образом данное направление применимо к большинству широко применяемых при строительстве ответственных конструкций видов сварки. Опубликованные работы [5-9] по микролегированию и модифицированию металла шва указывают на огромную перспективу в области повышения механических характеристик металла сварного шва.

Ведется разработка технологий сварки, позволяющей, технологически влияя на фактические механические свойства сварного шва путем изменения конструктивной геометрии разделки кромок под сварку. Такой подход позволяет применять для сварки высокопрочной стали менее прочные сварочные материалы, обеспечивающие повышенный, по сравнению с равнопрочными, запас вязкости и пластичности. При этом снижается требуемый размер усиления сварных швов что положительно сказывается на долговременной циклической прочности. Предварительная апробация [9, 10] такой технологии также показала положительные результаты и определило перспективность данного проекта. Особо примечательно что описанный технологический эффект увеличивается с ростом толщины свариваемого проката.

Ведутся исследования перспективных технологий сварки способных обеспечить снижение угловых деформаций сварных швов, уменьшение количества наплавленного металла, снижения вредного влияния сварочного термического цикла сварки и способствующих общему повышению производительности сварочных работ. Проводятся научные изыскания в области исследования трещиностойкости металла сварных соединений, влияния методов сварки, сварочных режимов, технологических и сопутствующих мероприятий на механические свойства металла шва.

Список литературы

1. Ильин А.В., Филин В.Ю. О соотношении локальных и энергетических критериях нестабильного хрупкого разрушения хладостойких сталей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 12. – С. 44-49.
2. Ильин А.В., Юрков М.Е. и др. Практика аттестационных испытаний высокопрочных хладостойких судостроительных сталей для получения свидетельства РМРС. 6-я Международная научно-техническая конференция «Судометрика-2016».
3. Башаев В.К., Ильин А.В. и др. «Об определении хладостойкости современных высокопрочных сталей для арктического применения» Научно-технический сборник РМРС №38/39 2015г.
4. Горынин И.В., Ильин А.В. Леонов В.П., Малышевский В.А. «Совершенствование требований к материалам для ЛСБУ на основе подходов механики разрушения. Научно-технический сборник РМРС №23 2000г. Мельников П.В. «Разработка порошковых проволок для сварки в защитном газе, обеспечивающем холодостойкость металла шва при температурах до -60°C » Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Санкт-Петербург. 2011г.
5. Кащенко Д.А. Брусницын Ю.Д., Дикарев В.В., Воронова О.В. «Разработка сварочных электродов с использованием плавных миналов». Материалы IV Международной конференции стран СНГ «Сварочные материалы». Краснодар, 2007г.
6. Кащенко Д.А., Мельников П.В., Могильников В.А. «Новые сварочные электроды и порошковые проволоки для строительства и ремонта магистральных трубопроводов. Сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции «Трубы 2009». Челябинск. 2009.
7. Кащенко Д.А. «Создание высокотехнологичных электродов для сварки хладостойких низколегированных сталей для морской техники и магистральных трубопроводов». Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. Санкт-Петербург. 2013г.
8. Кащенко Д.А., Брусницын Ю.Д., Баранов А.В., Руссо В.Л., Карпов И.Г. Разработка высокотехнологичных электродов для сварки магистральных трубопроводов и морской техники из высокопрочных низколегированных хладостойких сталей // Сварочное производство. – №2. – 2017. – С. 21-29.
9. Карпов И.Г. Кащенко Д.А. «Развитие технологии сварки для строительстве перспективных объектов судостроения и морской техники» Материалы 9-ой Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» в рамках «Международного военно-морского салона 2017г.» Санкт-Петербург, 2017г.

10. Барышников А.П., Кащенко Д.А., Карпов И.Г., Бишовков Р.В. Разработка низколегированных проволок сплошного сечения и эффективных технологий сварки высокопрочных сталей для эксплуатации в условиях Крайнего Севера // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2015. – № 4. – С. 106-112.

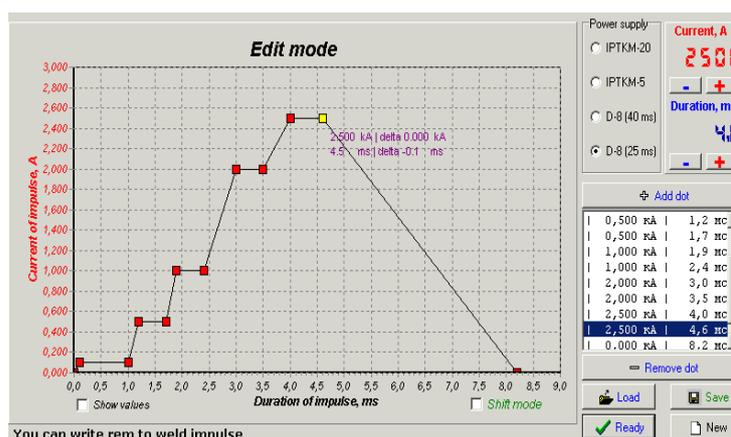
СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

А.С. КИСЕЛЕВ, А.С. ГОРДЫНЕЦ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: kas@tpu.ru

В настоящее время предлагаемые электронные компоненты и современные принципы преобразования электрической энергии позволили существенно улучшить сварочно-технологические свойства источников питания для контактной микросварки. Это обусловлено, в первую очередь, необходимостью формирования в сварочной цепи униполярных импульсов тока и повышенными требованиями к стабильности амплитудно-временных параметров режима сварки при изготовлении высокоответственных конструкций на предприятиях входящих в структуру Топливной компании «ТВЭЛ» Госкорпорации «Росатом».

На основе длительного и плодотворного сотрудничества между Томским политехническим университетом и ПАО «НЗХК» в начале XXI века было принято решение о совместной разработке источников питания нового поколения КА8 ($I_{\max}=8000$ А) и КА24 ($I_{\max}=24000$ А) для контактной сварки и оснащении ими производственных цехов. В основу этого оборудования был положен принцип DC-DC преобразования и модульная конструкция, что обеспечило возможность задания требуемого алгоритма изменения тока в сварочной цепи посредством цифрового синтеза, стабилизацию параметров режима сварки и существенное снижение нагрузки на питающую сеть [1].



Внешний вид источника питания КА8 и цифровой синтез формы импульса тока

Отличительные особенности источников питания КА8 и КА24:

- отсутствие трансформатора в сварочной цепи;
- наличие системы самодиагностики и резервирования модулей стабилизаторов тока;
- отсутствие пульсаций тока в сварочной цепи;
- наличие системы защиты от прожога свариваемых деталей;
- потребляемый ток от однофазной питающей сети (220 В) не более 16 А;
- разработаны и изготовлены в России.

Список литературы

1. Патент 2236333С1 Российская Федерация, МПК В23К11/24. Способ контактной сварки и источник питания для его реализации / Булычев В.И., Бычихин Н.А., Зарубин М.Г., Киселев А.С, Краснощеков Д.П., Лавренюк П.И., Нехода М.М., Пименов Ю.В., Поляков С.А., Рожков В.В., Советченко Б.Ф., Струков А.В., Чапаев И.Г., Эльман В.О., Юрин П.М. Патентообладатель Томский политехнический университет, ОАО «Новосибирский завод химконцентратов». – № 2003103870/02; заявл. 10.02.2003; опубл. 20.09.2004. – 3 с., ил.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ СРЕДНИХ ТОЛЩИН

Е.В. КОЗЫРЕВ, М.А. ИВАНОВ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

E-mail: evgesha-6@mail.ru

Существующие методики расчета скорости охлаждения ориентированы на два варианта толщин: первый – для больших толщин свыше 29 мм [1], когда не учитывается толщина свариваемой детали. В этом случае считается, что тепло от сварочного цикла расходуется быстро и холодного металла достаточно для распределения тепла. Во втором случае формулы учитывают толщину металла, так они рассчитаны на тонкие изделия с толщиной до 7.4 мм [1].

Когда время охлаждения не зависит от толщины материала, а поток тепла трехмерный, то время охлаждения рассчитывается по уравнению:

$$t_{8/5} = \frac{Q}{2\pi\lambda} \times \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right)$$

Когда время охлаждения зависит от толщины материала, а поток тепла двухмерный, то время охлаждения рассчитывается по уравнению:

$$t_{8/5} = \frac{Q^2}{4\pi\lambda\rho c d^2} \times \left(\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right)$$

Таблица

Q	Тепловложение	кДж/мм
$t_{8/5}$	Длительность остывания (от 800 °С до 500 °С)	с
T_0	Начальная температура пластины	°С
λ	Теплопроводность	Дж/см К с
ρ	Плотность	кг/м ³
c	Удельная теплоемкость	Дж/кг К

Указанные в Европейских нормах EN 1011 [2] существующих в трех официальных вариантах (английском, немецком, французском), рекомендации по расчету скорости охлаждения не учитывают интервал толщин от 7,4 до 29 мм [3].

Существует ряд работ, которые попытались ввести дополнительные расчетные коэффициенты. Которые бы связывали скорости охлаждения и ЗТВ (зона термического влияния). Что привело бы к способности нахождения скорости охлаждения при любых толщинах материала. Применимость формул по EN 1011 зависит от погонной энергии сварки, то есть не учитывает, что скорость охлаждения не одинакова во всех радиальных направлениях на поперечном сечении.

Выводы – таким образом, при расчете скорости охлаждения необходимо учитывать погонную энергию, а так же ширину ЗТВ. Данная проблема очень важна, из-за широкого применения материалов с толщинами от 7 до 29 мм. Решение проблемы требует дальнейшего изучения. Рассмотрение более широкого диапазона переменных значений при сварке.

ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКИХ СВАРНЫХ ШВОВ В СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН

Е.В. КОЗЫРЕВ, А.В. ШТАЛЬМАН, В.И. ОЛЕЙНИЧУК, М.А. ФРОЛОВ

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

E-mail: ivanovma@susu.ru

Появление и широкое использование современных высокопрочных сталей в судостроении, в которых повышение прочности материала достигается не столько за счет легирования, сколько за счет специальных видов термической и термомеханической обработки металла требует оценки склонности к образованию холодных трещин.

Основными факторами, влияющими на образование холодных трещин, являются высокая скорость охлаждения сварного соединения, приводящая к появлению закалочных структур бейнитного и мартенситного типов, наличие высоких растягивающих остаточных напряжений и водорода, а также температура предварительного подогрева и механическая неоднородность сварного соединения [1]. Наличие жестких схем закрепления деталей или сварки по замкнутому контуру, повышают вероятность образования холодных трещин.

Известно [2], что холодные трещины образуются вследствие выделения диффузионного водорода. Однако диффузионный водород в сварном соединении распределяется неравномерно. При равной средней концентрации водорода по сварному соединению, его максимальная локализация будет на участках, с максимальными растягивающими напряжениями. Уровень остаточных сварочных напряжений зависит от предела текучести наплавленного металла, т.е. с увеличением предела текучести увеличиваются остаточные растягивающие напряжения в сварном шве. В таком случае применение более прочных сварочных материалов, при прочих равных условиях, должно привести к повышению вероятности образования холодных трещин. Следовательно, применение более мягких сварочных материалов должно приводить к снижению риска образования холодных трещин.

Использование более мягких по пределу текучести сварочных материалов рекомендуется в ряде нормативных документов [3], а также производителями высокопрочных сталей, например, фирмой SSAB [4].

Однако, для обеспечения конструкционной прочности выполненное сварное соединение должно быть равнопрочным к основному металлу. Данное требование введено в рекомендации судостроительной международной ассоциации классификационных обществ, МАКО (англ. International Association of Classification Societies, IACS [5]), в которую входит как Россия, так и Китай. Это приводит к повышенному риску образования холодных трещин, а также к высокой стоимости сварочных работ, так как морской регистр требует применения дорогих порошковых проволок с высоким пределом текучести, не ниже предела текучести основного металла.

Как было показано выше, применение более мягких сварочных материалов приведет к снижению растягивающих напряжений, и снижению локализации диффузионного водорода в зоне растягивающих напряжений, что позволит снизить риск образования холодных трещин. Однако, в этом случае необходимо учитывать механическую неоднородность сварного соединения, так как сварной шов будет мягким. Поэтому необходимо провести конструирование нового равнопрочного сварного соединения с мягкими швами путем изменения его геометрических параметров, например, увеличения катета шва для таврового соединения или высоты усиления шва для стыкового соединения.

Рассмотрим данное положение на примере углового шва таврового соединения. Примем, что сварной шов мягче по пределу текучести основного металла, например, основной металл из стали E500W ($\sigma_{0,2} \geq 500$ МПа), а сварочный материал соответствует категории 4Y42 ($\sigma_{0,2} \geq 420$ МПа). Тогда необходимо увеличить площадь катета сварного шва на уровень механической неоднородности. Например, в базовой конструкции

используется катет 14 мм, его площадь равна $S_{500} = 98 \text{ мм}^2$. Механическая неоднородность $\frac{\sigma_{0,2}^{500}}{\sigma_{0,2}^{420}} = 1,19$. Тогда новый катет будет равен:

$$K = \sqrt{2 * S_{500} \frac{\sigma_{0,2}^{500}}{\sigma_{0,2}^{420}}} = 15,3 \text{ мм}^2$$

Таким образом снижение прочности сварочных материалов на 1 категорию с 4Y50 ($\sigma_{0,2} \geq 500 \text{ МПа}$) до 4Y42 ($\sigma_{0,2} \geq 420 \text{ МПа}$) приведет к увеличению катета всего на 1,3 мм, но одновременно с этим позволит использовать более дешевые сварочные материалы и снизит риск образования холодных трещин вследствие меньших растягивающих напряжений и большей пластичности.

Если увеличение катета сварного шва для ряда толщин будет невозможно, то рекомендуется рассмотреть комбинированный сварной шов, состоящий из мягкого корня и твердых заполняющих слоев.

Список литературы

1. Гончаров, С.Н. Холодные трещины при сварке высокопрочных среднелегированных сталей [Текст]: [монография] / С.Н. Гончаров, М.П. Шалимов; М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Открытое АО "Уральский з-д трансп. машиностроения". – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 94, [1] с.: ил.; 21 см.; ISBN 978-5-321-02196-5.
2. Fuqian Yang Interaction between diffusion and chemical stresses -- Materials Science and Engineering A 409 (2005) 153-159.
3. EN 1993-1-12 2009 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700.
4. <https://www.ssab.ru/-/media/files/ru/strenx/ssab-strenx-welding-ru.pdf?m=20170407090433>
Рекомендации по выбору сварочных материалов от производителя высокопрочных сталей SSAB Strenx™.
5. <http://www.iacs.org.uk>.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА ОСНОВЕ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ ФЕРРОХРОМА

Н.А. КОЗЫРЕВ, А.А. УСОЛЬЦЕВ, Р.Е. КРЮКОВ, А.Н. ПРУДНИКОВ, Д.Е. БЕЛОВ

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Разработке новых порошковых проволок для наплавки различных материалов уделяется большое внимание в мировой практике [1-6]. Исследование новых порошковых проволок и технологий наплавки проводится в условиях ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный институт», причем ряд порошковых проволок защищен патентами РФ [7-8]. Особое внимание уделяется технологиям прямого легирования или восстановления металлов из оксидной фазы с помощью восстановителя непосредственно в дуге при наплавке.

В данной работе рассмотрена возможность изготовления порошковых проволок на основе пыли газоочистки алюминиевого производства, порошков кремния и алюминия (в качестве восстановителя) и пыли газоочистки производства феррохрома (в качестве восстанавливаемого компонента - оксида хрома).

Изучена возможность изготовления порошковой проволоки с использованием пыли газоочистки производства феррохрома в качестве восстанавливаемого материала и в качестве восстановителей: пыль газоочистки алюминиевого производства (углерод), порошок кремния КР-1 по ГОСТ 2169-69 и алюминий ПАП-1 по ГОСТ 5494-95 при различном соотношении компонентов.

В исследованиях использовали пыль газоочистки феррохрома с химическим составом, мас. %: $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 22,5$; $\text{SiO}_2 = 15,5$; $\text{CaO} = 0,4$; $\text{MgO} = 31,1$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,4$; $\text{FeO} = 6,0$; $\text{C} = 6,2$; $\text{S} = 1,2$, в качестве восстановителя использовали порошки: кремния КР-1, мас. %: $\text{Si} = 98,00$; $\text{Fe} = 0,7$; $\text{Al} = 0,7$, $\text{Ca} = 0,6$; алюминия ПАП-1, мас. % Al не менее 97, $\text{Fe} = 0,5$; $\text{Si} = 0,4$; $\text{Cu} = 0,05$; $\text{Mn} = 0,01$; а также в качестве углеродосодержащего материала пыль газоочистки алюминиевого производства, мас. %: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 21-46,23$; $\text{F} = 18-27$; $\text{Na}_2\text{O} = 8-15$; $\text{K}_2\text{O} = 0,4-6$; $\text{CaO} = 0,7-2,3$; $\text{SiO}_2 = 0,5-2,48$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,1-3,27$; $\text{C}_{\text{общ}} = 12,5-30,2$; $\text{MnO} = 0,07-0,9$; $\text{MgO} = 0,06-0,9$; $\text{S} = 0,09-0,19$; $\text{P} = 0,1-0,18$.

Наплавку проводили под флюсом, изготовленным из шлака силикомарганца с химическим составом: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,91-9,62\%$, $\text{CaO} = 22,85-31,70\%$, $\text{SiO}_2 = 46,46-48,16\%$, $\text{FeO} = 0,27-0,81\%$, $\text{MgO} = 6,48-7,92\%$, $\text{MnO} = 8,01-8,43\%$, $\text{F} = 0,28-0,76\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0,26-0,36\%$, $\text{K}_2\text{O} = 0,62\%$, $\text{S} = 0,15-0,17\%$, $\text{P} = 0,01\%$, с использованием сварочного трактора АСАВ-1250 на стальные пластины толщиной 10 x 100 x 500 мм.

Подобран режим наплавки. Определен химический состав наплавленного металла, проведены испытания на износ и замер твердости образцов.

Химический состав наплавленного металла и полученных шлаковых корок определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 и рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800. Твёрдость наплавленных слоев измеряли с помощью твердомера МЕТ-ДУ. Износ образцов производили на машине 2070 СМТ-1. При испытании на износостойкость использовали метод потери массы образца по типу диск-колодка. В процессе испытания образец взаимодействовал с колодкой, изготовленной из стали типа Р18.

Рассчитаны коэффициенты усвоения хрома при различных соотношениях компонентов. Изучение химического состава наплавленного металла порошковыми проволоками, разработанными на основе пыли газоочистки производства феррохрома показало, что усвоение хрома в наплавленном слое полностью зависит от коэффициента заполнения порошковой проволоки. Причем при прочих равных условиях с повышением концентрации хрома в наплавленном металле снижается износ поверхности.

По результатам проведенного анализа определены зависимости твердости наплавленного слоя и его износостойкости от массовой доли элементов, входящих в состав порошковой проволоки. Рассмотренные зависимости использованы для прогнозирования

твердости наплавленного слоя и его износостойкости при изменении химического состава наплавленного металла.

Изучение химического состава наплавленного металла порошковыми проволоками, разработанными на основе пыли газоочистки производства феррохрома показало, что усвоение хрома в наплавленном слое полностью зависит от коэффициента заполнения порошковой проволоки. Причем при прочих равных условиях с повышением концентрации хрома снижается износ поверхности.

Определены зависимости твердости и износостойкости наплавленных слоев от содержания в них углерода и хрома, полученных с использованием опытных порошковых проволок на основе пыли газоочистки производства феррохрома, Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования износостойкости слоев, наплавленных на стальные изделия при помощи опытных порошковых проволок.

Список литературы

1. М.В. Тепляшин. Исследование влияния легирующих элементов на износостойкость в сплавах, предназначенных для электрошлаковой наплавки бил молотковых мельниц / М.В. Тепляшин, В. Г. Комков // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ» 2013. – Том 4. – № 4. – С. 1554–1561.
2. М. В. Тепляшин. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц / М. В. Тепляшин, В. Г. Комков, В. А. Стариенко // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ» 2013. – Том 4. – № 4. – С. 1543–1549.
3. Падекин В.П., Рахимов К.З. Производство порошковой проволоки. – М.: Metallurgy, 1979. – 80 с.
4. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Metallurgy, 1975. – 584 с.
5. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. – М.: Metallurgy, 1976. – 560 с.
6. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Metallurgy, 1974. – 768 с.
7. Пат. 2623981 РФ, МПК8 В23 К35/36 В 23К35/368 Шихта порошковой проволоки/ Козырев Н.А., Галевский Г.В., Шурупов В.М., Крюков Р.Е., Козырева О.Е., Бендре Ю.В., Оршанская Е.Г.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».- № 2015152933/02(081567), Заявл. 09.12.2015, опубл. 29.06.2017 Бюл. № 19.
8. Пат. 2661126 МПК8 В23 К35/36 В 23 К35/368 Шихта порошковой проволоки/ Козырев Н.А., Уманский А.А., Крюков Р.Е., Думова Л.В., Козырева О.А., Непомнящих А.С., Федотов Е.Е.; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».- № 2017121945/02(038002), Заявл. 21.06.2017.

МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ППМГ ЧЕРЕЗ Р. ЛЕНА МЕТОДОМ ПРОФИЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

З.Г. КОРНИЛОВА, Ю.А. ЯКОВЛЕВ, А.А. АНТОНОВ

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: zoya_korn@mail.ru, djukka@mail.ru, santaz7@rambler.ru

Для магистрального транспорта нефти и газа проблемы обеспечения эксплуатационной надежности подводных переходов имеют особую значимость, поскольку отказы и аварии на них по своим экономическим и экологическим последствиям значительно превосходят аналогичные происшествия на линейной части. На магистральных газопроводах РФ, протяженность которых составляет 153 тыс. км, эксплуатируется 1620 подводных переходов, или 2529 ниток общей протяженностью в русловой части 1445 км, в том числе 253 перехода (483 нитки) пересекают судоходные реки [1].

Целью работы является определение его фактического планово-высотного положения, на основании которого делается расчет напряженно-деформированного состояния его элементов, а также принимается решение о необходимости ремонта.

Объект исследования

Подводный переход магистрального газопровода (ППМГ) через р. Лена предназначен для газификации Заречных улусов Республики Саха (Якутия) и является продолжением магистрального газопровода ГРС-2-Хатассы (проект 0371.00.03.МГ.000.000.000.ПЗО). Начальной точкой основной нитки газопровода является ПК 1+00 (10,5 км) магистрального газопровода Ду 500 ГРС-2-Хатассы. Конечная точка – узел подключения резервной нитки на правом берегу р. Лена у п. Павловск. Протяженность нитки – 16,96 км, пропускная способность газопровода – 528 млн. м³/год, условный диаметр газопровода – Ду500, максимальное рабочее давление газопровода – 55 кгс/см². В состав построенного ППМГ р. Лена входят: основная нитки МГ Ду = 500, резервная нитка МГ Ду = 500, узел запуска очистного устройства, узел приема очистного устройства, крановые площадки [2].

Материалы и методы

Для установления планово-высотного положения двух ниток на пойменном участке ППМГ нами применялся трассоискатель «RD-8000». Трассоискателем находилось положение оси трубопровода для установки контрольной точки. Контрольная точка на местности закрепляется штатной рейкой и нумеруется. После закрепления всех контрольных точек на участке трассоискатель устанавливался в контрольных точках поочередно и производился замер глубины залегания оси трубопровода. На каждой контрольной точке измерение глубины производили не менее трех раз. Для определения планово-высотного положения контрольных точек использовался электронный тахеометр. На одном из долговременных опорных пунктов устанавливался тахеометр, который центрируется, нивелируется и ориентируется на смежный временный опорный пункт. Для учета высоты тахеометра рулеткой замерялась высота прибора до центра пункта. Точность центрирования прибора в плане над центром репера – 1 мм [3].

Для контроля точности выполняемых трассоискателем измерений вычислялась разница с фактической глубиной залегания оси трубопровода, полученной при помощи щупа в произвольных 2-3 контрольных точках на обследуемом участке.

По результатам обследований построены графики в Балтийской системе высот, где обозначены поверхность рельефа земли и магистральный газопровод.

Результаты и выводы

Зафиксирован неравномерный характер распределения планово-высотных положений I-й и II-й ниток ППМГ на пойменных участках со стороны правого и левого берегов реки, что, скорее всего, связано с неравномерностью пучения, процессами протаивания и промерзания грунтов, а также процессами осадки и всплывания газопровода вследствие неоднородности состава грунтов, распределения влаги, плотности, условий промерзания и т. д. по трассе ППМГ через р. Лена.

Выявлено значительное изменение планово-высотных положений дюкеров I-й и II-й ниток ППМГ в районе Хаптагайской протоки по сравнению с их планово-высотными положениями, установленными ранее. В результате таких ухудшений планово-высотных положений двух ниток ППМГ в районе Хаптагайской протоки увеличивается вероятность их полного промерзания и повышения жесткости их заземления в зимний период.

Список литературы

1. Иванов Е.А., Дадонов Ю.А., Мокроусов С.Н., Пашков Н.Е. О техническом состоянии магистрального трубопроводного транспорта России // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 9. – С. 34-37.
2. Аммосов А.П., Корнилова З.Г. О строительстве подводных переходов магистральных трубопроводов (Аналитический обзор). – Якутск: Изд-во ЯГУ, 2008, 58 с.
3. Аммосов А.П., Яковлев Ю.А., Ильин Г.Ю., Корнилова З.Г. Особенности изменения положения ППМГ «Хатассы-Павловск» через р. Лена и разрушения по сварным соединениям стыков труб дюкера // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5 – С. 44-49.

К 30-ЛЕТИЮ ООО "КОМПОЗИТ" - ПЕРВОГО НА УРАЛЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ И УПРОЧНЕНИЮ ГОРНО- МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.А. КОРОТКОВ

Нижнетагильский филиал Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина, г. Нижний Тагил
Email: vk@udgz.ru

В 50-х годах прошлого века пришло осознание, что причиной большей части отказав машин и оборудования (80%), является износ. В Англии, в связи с этим, в 60-х годах учредили новую дисциплину – Трибологию, у нас же на Урале профессор Разиков М.И. создал в УПИ (ныне УрФУ) «Отраслевую лабораторию наплавки». Наплавка рассматривалась как удобный и экономичный способ восстановления рабочих поверхностей деталей и штампов с одновременным приданием им износостойкости [1]. Это научное направление 70..80ые годы получило развитие в Нижнетагильском филиале УПИ под руководством доцента, к.т.н. И.А. Толстова. В 1990г, когда позволили экономические преобразования, здесь было организовано научно-производственное предприятие, чуть позже преобразованное в ООО «Композит». В начале 90-х «Композит» многократно увеличил срок службы сварных стыков кислотопроводов, а упрочнением роликов рольгангов ликвидировал массовый брак при прокатке балок по американскому стандарту. Это позволило ему получить на Нижнетагильском металлургическом комбинате (ныне ЕВРАЗ НТМК) в аренду производственные площади под сварочно-наплавочные работы [2]. В это же время впервые в отрасли был восстановлен многотонный вал одной из 3-х конусных дробилок Качканарского ГОКа, чем предупреждена потеря комбинатом 33,3% выработки в течение 8мес, до изготовления на Уралмашзаводе нового вала [3]. Позднее был восстановлен конус для этого вала, что представляло не менее сложную задачу [4]. После дефолта 1998г, началось промышленное оживление, но в распоряжении предприятий имелось лишь давно не отремонтированное оборудование, что предопределило актуальность ускорения ремонтных работ. С этой целью впервые в отрасли на Высокогорском ГОКе применили передвижные посты полуавтоматической сварки, что не только в 3 раза сократило время сварки, но и дало улучшение качества сварных соединений, т.к. сварщики перестали заполнять разделки прутками [5]. Интенсификация производства сопровождалась износом частей крупного оборудования, в том числе корпусов редукторов, валов щековых дробилок, шахтных скиповых подъемников. Последние находятся на копрах высотой 40-50м, что создает дополнительные трудности их ремонта. В связи с этим были исследованы возможности восстановления малых износов (до 0,5мм) методом электроискрового-легирования (ЭИЛ). Это позволило прямо по месту эксплуатации проводить восстановление массивных изношенных частей оборудования [6], а также решать задачи увеличения износостойкости [7].

В начале 2-х тысячных годов Уралвагонзавод впервые за 10 лет простоя получил госзаказ на поставку вагонов, но его выполнение сдерживало отсутствие технологии износостойкой наплавки автосцепок. «Композит» выполнил ее разработку, которая в сжатые сроки была успешно освоена заводом в крупносерийном производстве, что способствовало созданию на нем «Бюро триботехники», впоследствии преобразованного в «Отдел триботехники и нанотехнологий» [8, 9].

Эти и другие успешные работы с Уральскими предприятиями позволили «Композиту» в 2001г в городской черте Нижнего Тагила приобрести цех с механической мастерской, административно-бытовым корпусом и двумя холодными складами (рис.1).

В 90-х в металлургической отрасли шло активное строительство машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). «Композит» один из первых в стране начал наплавку их роликов хромистой сталью, дающей трехкратное увеличение стойкости, а затем разработал импортозамещающие марки проволоки для наплавки [10, 11].



Рисунок 1 - Производственная база ООО «Композит»

В производстве агломерата (основное сырье для доменных печей) важную роль играет подача воздуха, которую обеспечивают нагнетатели. Из-за ненадлежащей работы фильтров лопадки роторов нагнетателей могут быстро изнашиваться и дорогостоящее изделие (более 1 млн. руб.) выходит из строя через несколько месяцев, и даже через несколько недель работы. В связи с этим в конце 90х годов была разработана технология износостойкой наплавки новых роторов и технология восстановления их после износа, а так же выполнен расчет экономической эффективности [12].

Важным событием в жизни «Композита» стала разработка в 2002г способа и установки УДГЗ-200 для плазменной закалки, допускающей ручное ведение процесса. Сама плазменная закалка известна еще с 80х годов прошлого века, но ведение ее тогда было возможно лишь в автоматическом режиме, ибо даже небольшое изменение длины дуги или скорости перемещения (неизбежные при ручном ведении) приводили к потере закаленного слоя или повреждению поверхности «оплавлением». Ручная закалка сделала доступной упрочнению поверхности, которые по тем или иным причинам не упрочнялись и становились причинами частых ремонтов. По сравнению с объемной закалкой поверхностная закалка плазменной дугой обеспечивает более высокую твердость и, соответственно, более долгий срок эксплуатации [13, 14]. Установка удостоена в 2008г медали Женевского салона инноваций и изобретений, а молодые участники разработки – Премии губернатора Свердловской области для молодых ученых. К настоящему времени выпущено свыше 120 установок УДГЗ-200 (рис.2), которые поставлены на предприятия РФ, Беларуси, Украины, Киргизии, Азербайджана, Казахстана.



Рисунок 2 - Закалка установкой УДГЗ-200 зубьев шестерни сталеразливочного крана



Рисунок 3 - Вручение в 2011г грамоты Правительства РФ предприятию ООО «Композит»

ООО «Композит» зародившись в Нижнетагильском филиале УПИ (УрФУ) продолжал поддерживать с ним сотрудничество. Его результатом стало проведение с 2001г серийной (раз в два года) научно-практической конференции «Сварка. Реновация. Триботехника». Разработан и читается учебный курс «Износостойкость машин», благодаря которому студенты изучают не только как проектировать машины (Теоретическая механика) и предупреждать их поломки (Соппротивление материалов), но как защищать их от быстрого износа. Совместно с учеными вуза работниками «Композита» было опубликовано более 100 статей в рецензируемых журналах на актуальные темы свариваемости, износостойкости, реновации, сделано более 14 изобретений. Работа «Композита» неоднократно отмечалась органами власти, в том числе грамотами Правительства РФ, рис. 3.

Список литературы

1. Коротков В.А. Научные разработки по износостойкости машин // Машиностроение и инженерное образование. – 2012. – № 1. – С. 77-83.
2. Коротков В.А., Киричков А.А., Зудов Е.Г. Внедрение научных достижений с привлечением малого бизнеса // Сталь. – 1995. – № 1. – С. 66-68.
3. Коротков В.А., Агафонов Э.Ж., Титов Н.С., Хмельков В.Г. Восстановление наплавкой многотонных валов конусных дробилок // Горный журнал. – 1997. – № 7. – С. 46-50.
4. Коротков В.А., Агафонов Э.Ж., Веснин А.М., Смирнов Ю.К. Ремонтная сварка конусов дробилок ККД-1500/180 // Сварочное производство. – 2009. – № 10. – С. 31-34.
5. Коротков В.А. Опыт применения сварочных полуавтоматов на предприятиях Уральского региона // Сварочное производство. – 2004. – № 3. – С. 32-36.
6. Коротков В.А. Применение электроискровой обработки при ремонте механического оборудования // Вестник машиностроения. – 2018. – № 1. – С. 77-81.
7. Коротков В.А., Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М. Электроискровое упрочнение поверхности трения // Поверхность. – 1997. – № 2. – С. 93-97.
8. Коротков В.А., Зотов А.С., Головизнин Л.Б., Ефимов В.П., Павлов Н.В., Стрельникова В.В. Технология механизированной наплавки автосцепок // Сварочное производство. – 2005. – № 9. – С. 15-18.
9. Андронов В.А., Коротков В.А. О работе «Бюро триботехники» на Уралвагонзаводе // Вестник машиностроения. – 2009. – № 4. – С. 49-52.
10. Коротков В.А., Михайлов И.Д., Кузовков А.Я., Веселов А.С. Опыт наплавки хромистых сталей // Сталь. – 1997. – № 12. – С. 38-40.
11. Коротков В.А., Михайлов И.Д. Наплавка роликов МНЛЗ // Сварочное производство. – 2011. – № 8. – С. 33-35.
12. Коротков В.А. Опыт промышленной наплавки лопаток роторов нагнетателей // Промышленная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 36-39.
13. Коротков В.А. Ручной плазменной закалке – 15 лет // Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 62-68.
14. Коротков В.А. Плазменная закалка в прессовом производстве // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2018. – №1. – С. 24-27.

ШАДРИНСКИЙ ЭЛЕКТРОДНЫЙ ЗАВОД. ПРОИЗВОДИТЕЛЬ САРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

А.Н. КОРЧАНОВ

ООО «ШЭЗ», Курганская обл., г. Шадринск
E-mail: shadr@goodel.ru

В докладе представлена информация о предприятии: краткая история развития; основные цели и задачи на сегодняшний день; о системе управления качеством.

Кратко приведена информация о выпускаемой номенклатуре, а именно: электроды для сварки углеродистых и низколегированных сталей; для сварки высоколегированных сталей; для сварки легированных теплоустойчивых сталей; для резки листа, проката и арматуры; для электродуговой наплавки; для сварки и наплавки меди и сплавов на ее основе; для сварки и наплавки чугуна.

Так же приведена информация о инновационной разработке сварочных электродов марки Goodel – 52U (Гудел – 52У) с основным покрытием. Данная марка предназначена преимущественно для ручной дуговой сварки стыков нефтегазопроводных труб и трубных элементов ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением разрыву до 510 МПа, работающих при отрицательных температурах до минус 50 °С. Электроды обеспечивают гарантированный провар корня шва и формирование обратного валика внутри трубы, куда доступ во многих случаях невозможен, а так же наплавленный металл характеризуется высокой стойкостью против образования кристаллизационных трещин и низким содержанием водорода. По результатам независимых испытаний, электроды рекомендуются для сварки всех слоев шва трубопроводов.

ОБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

С.А. КОЧЕРГИН

ФГУП "НПО" ТЕХНОМАШ", г. Москва

E-mail: info@tmnpo.ru

В настоящее время перед предприятиями-изготовителями РКТ поставлены задачи повышения качества сварных швов деталей сборочных единиц (ДСЕ) сварных конструкций (форсунок, гофр, мембран клапанов системы автоматики, шаробаллонов, сифонов, камер сгорания, тепловых труб, корпусных деталей и др.), эффективности и надежности сварочного оборудования, учитывая физический и моральный износ действующего.

Для решения поставленных задач на предприятии ФГУП «НПО «Техномаш» разработано оборудование для лазерной сварки на базе иттербиевых волоконных лазеров различной мощности, работающих как в непрерывном, так и в модулируемом режиме. Отработана технология лазерной сварки форсунок, сифонов, мембран, клапанов и др. применительно к изделиям «Воронежского механического завода» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева».

Также ФГУП «НПО «Техномаш» ведутся работы по разработке и изготовлению опытного образца специально технологического оборудования (ОО СТО) для электронно-лучевой сварки тепловых труб, длиной до 3000 мм.

Изготовлен опытный образец установки ЭЛС в общем вакууме сборочных единиц корпусных изделий РКТ на базе электронно-лучевой аппаратуры с ускоряющим напряжением до 60 кВ. Объем вакуумной камеры опытного образца установки составляет 135 м³. На данном оборудовании выполнена отработка технологии сварки на образцах из алюминиевого сплава Амг6 толщиной до 32 мм.

Ведется изготовление установок для ЭЛС в локальном вакууме врезных фланцев диаметром до 200 мм и продольных швов обечаек до 2000 мм.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ TIG СВАРКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

А.С. КРАВЧЕНКО

Комсомольский-на-Амуре Государственный Университет, г. Комсомольск-на-Амуре
E-mail: a.kraw4encko2017@yandex.ru

Цель работы: Снижение уровня дефектности и достижения эксплуатационных требований предъявляемых к сварным соединениям элементов трубопроводных систем летательных аппаратов (ЛА) из нержавеющей стали.

В статье представлены результаты исследований влияния силы сварочного тока, угла заточки вольфрамового электрода и защиты корня шва на геометрические характеристики, вероятность образования внутренних дефектов и механические свойства кольцевых неповоротных сварных соединений нержавеющей стали.

Для исследований были изготовлены образцы-имитаторы с размерами: Ø 63 мм, длина 75 мм, толщина стенки – 1 мм, материал – 12X18H10T. Подготовка кромок перед сваркой осуществлялась в соответствии с требованиями ПИ 1.4.748-80. Параметры режима сварки менялись в соответствии с программой экспериментов (таблица 1).

Измерение геометрических параметров производились при помощи комплекта для визуально-измерительного контроля ВИК-1. Наличие внутренних дефектов определялось на рентгенотелевизионном комплексе FILIN-240/225.FP8.C-ARM в соответствии с требованиями инструкции ПИ 1.4.415-92 и ГОСТ 7512-82. Испытания на статическое растяжение сварных соединений проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 3382 (США) по ГОСТ 6996-69, тип образцов XII.

Таблица 1 – Программа экспериментов

Трубные образцы			
Номер опыта	Сила сварочного тока, А	Угол заточки электрода, град	Защита корня шва
1	60	45	Нет
2	60	45	Продув аргоном
3	50	45	Продув аргоном
4	70	45	Продув аргоном
5	60	35	Продув аргоном
6	60	55	Продув аргоном
7	50	35	Продув аргоном
8	70	55	Продув аргоном

По результатам визуально-измерительного контроля установлено: наиболее благоприятные режимы - 2, 5 и 8.

Оценка наличия внутренних дефектов: основными дефектами являются поры (различного вида) и непровары в корне шва. В результате рентгенографического контроля выявлено: оптимальными режимами сварки являются режимы с номерами 4, 5 и 8. С учетом данных визуально-измерительного контроля - режимы 5 и 8. Наиболее неблагоприятными режимами являются режимы под номерами 1, 3 и 7, для которых вероятность возникновения внутренних дефектов превышает 25%.

Оценка уровня механических свойств: удовлетворительным были признаны те режимы сварки, при которых разрушение образца произошло по основному металлу либо сварному соединению или околошовной зоне, при этом значения предела прочности должно быть ниже предела прочности основного металла на величину не более 10 %.

Результаты: неудовлетворительные режимы сварки - 1, 3 и 7. Прочность остальных образцов удовлетворительна, однако лишь два режима можно считать благоприятными –

режимы 5 и 8. Результаты механических испытаний подтвердили результаты визуально-измерительного и рентгенконтроля.

Выводы: а) Для получения качественного сварного соединения обязательна организация защиты корня шва аргоном.

б) При уменьшении угла заточки электрода увеличивается проплавливающая способность дуги, в результате существенно увеличиваются ширина и высота корня шва, ширина усиления практически не изменяется, высота усиления уменьшается. Влияние на вероятность возникновения внутренних дефектов: при уменьшении угла заточки - снижается вероятность возникновения дефектов. На механические свойства, получаемого сварного соединения угол заточки электрода оказывает косвенное влияние за счет изменения характеристик дугового разряда (концентрация дуги, тепловая эффективность дуги).

в) С увеличением силы сварочного тока - повышается вероятность получения сварного шва с нестабильной геометрией по длине. На вероятность образования пор и непроваров оказывается следующее влияние: при увеличении - вероятность возникновения снижается. Влияние изменения силы сварочного тока на механические свойства соединения: увеличением силы сварочного тока одновременно со скоростью сварки дает возможность получить сварное соединение с более высокими механическими свойствами.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА АРГОННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТОНКОЛИСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

А.С. КРАВЧЕНКО

Комсомольский-на-Амуре Государственный Университет, г. Комсомольск-на-Амуре
E-mail: a.kraw4encko2017@yandex.ru

Цель работы: Снижение уровня дефектности и достижения эксплуатационных требований предъявляемых к сварным соединениям элементов трубопроводных систем летательных аппаратов (ЛА) из нержавеющей стали.

В статье представлены данные металлографических исследований влияния термического цикла сварки на свойства стыковых соединений плоских образцов. Получено уравнение, отражающее зависимость прочности при статическом растяжении от силы тока и скорости сварки.

Объектом исследований являлись сварные швы и зона термического влияния плоских (150x80x1 мм) образцов из хромоникелевой стали 12X18H10T полученные ручной АрДЭС. Тип соединения С00001-1620 по ОСТ 1 02617-87. Параметры режима сварки менялись в соответствии с программой экспериментов (таблица 1).

При подготовке образцов для микроструктурных исследований на и микроскопе NikonEclipse MA200 использовался шлифовально-полировальный станок BLUHLER EcoMet 250 Pro. Химический анализ сварных соединений был выполнен на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi S 3400-N. Измерение микротвердости по Виккерсу осуществлялось на микротвердомере DuraScan EmcoTest согласно с ГОСТ 2999-75. Определение содержания ферритной фазы в металле шва проводилось при помощи ферритометра МФ-51НЦ в соответствии с ГОСТ Р 53686-2009. Регрессионный анализ в системе *Statistica 10* был проведен в модуле *Multiple regression*.

Таблица 1 – Программа экспериментов

Плоские образцы			
Номер опыта	Сила сварочного тока, А	Скорость сварки, мм/мин	Защита корня шва
1	50	240	Продув аргоном
2	60	280	Продув аргоном
3	70	320	Продув аргоном
4	50	240	Продув аргоном
5	50	320	Продув аргоном
6	70	240	Продув аргоном
7	70	320	Продув аргоном

Объектом металлографических исследований являлись характерные зоны сварных соединений: сварной шов, зона сплавления, зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл. Исследовались образцы, полученные в результате опыта №1,2,3.

По результатам замера площадей характерных зон было выявлено, что образец 3 имеет более благоприятную структуру (наименьшие площади зон сплавления и термического влияния).

Результаты химического анализа:

1. Среднее содержание легирующих элементов во всех соединениях эквивалентно либо превосходит содержание этих элементов в основном металле.
2. Сварное соединение образца 3 имеет более равномерным распределением легирующих элементов по сечению шва.

Результаты измерения микротвердости: образцам под номером 1 и 2 присуща прочностная неоднородность. Образец 3 имеет как более высокие, так и более равномерные значения микротвердости по сечению сварного шва.

Измерение содержания ферритной фазы в исследуемых сварных соединениях показало, что:

1. Режимам с минимальной скоростью сварки соответствует большее содержание феррита.

2. Влияние силы сварочного тока противоположно.

Определение предела прочности сварных соединений (откликов) для проведения регрессионного анализа выявило, что:

1. С увеличением силы тока увеличивается как прочность, так и пластичность образцов.

2. Влияние скорости сварки обратное.

Применение модуля *Множественная регрессия* показало сильную и достоверную корреляционную связь между пределом прочности и силой сварочного тока и скоростью сварки, которая описывается уравнением:

$$Y=397+3,05 \cdot X1-015 \cdot X2,$$

где $X1$ – сила сварочного тока;

$X2$ – скорость сварки.

Выводы:

1) Режим с большей силой тока и скоростью сварки является наиболее благоприятным, так как: обеспечивает получение сварного шва с более благоприятной микроструктурой, снижает ликвацию и обеспечивает прочностную однородность сварного соединения.

2) Получена линейная регрессионная модель, отражающая зависимость предела прочности сварных соединений нержавеющей стали 12X18Н10Т толщиной 1 мм с присадочной проволокой 06X19Н9Т от силы сварочного тока и скорости сварки:

$$Y=397+3,05 \cdot X1-015 \cdot X2,$$

где $X1$ – сила сварочного тока;

$X2$ – скорость сварки.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФОРМАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ И СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Р.А. КРЕКТУЛЕВА, Ю.Н. САРАЕВ, В.М. СЕМЕНЧУК, Р.О. ЧЕРЕПАНОВ¹, Р.О. БЕЗГИНОВ²

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск,

¹Томский научный центр СО РАН, г. Томск,

²ООО «Газпром трансгаз Томск», г. Томск

E-mail: rakrekt@mail.ru

Развитие компьютерной индустрии и IT-технологий повлекло за собой массовую автоматизацию и компьютеризацию различных сфер жизнедеятельности современного сложно организованного производства. На этом пути есть как несомненные успехи, так и очевидные трудности, которые связаны с тем, что далеко не для каждого технологического процесса созданы его компьютерные аналоги, и не каждый компьютерный аналог можно использовать в качестве базы для автоматизированного проектирования и поиска управленческих решений. Технологии сварочного производства в большинстве своем как раз относятся к таким трудным объектам автоматизации. Это, прежде всего, связано со сложностью и недостаточной изученностью физико-механических явлений, сопровождающих процессы формирования сварных соединений, поскольку при этом, как правило, задействованы все известные науке энергетические превращения. Их семь: деформационные, тепловые, электромагнитные, световые, химические, радиационные и внутриатомные. Также присутствуют все фазовые состояния вещества. Их четыре: твердое, жидкое, газообразное и плазменное. Разнообразие всевозможных энергетических процессов привело к созданию различных типов технологического оборудования, основанного на выделении тех или иных механизмов соединения отдельных частей в единое целое: сварка взрывом, диффузионная сварка, сварка плавлением и другие.

Данная работа посвящена алгоритмизации и формализации ряда сварочных технологий плавления (электродуговой, газотермической, плазменной и других), то есть созданию их компьютерных аналогов на основе построения математической модели сварки плавлением с учетом разнообразия граничных и начальных условий, нелинейности физико-механических характеристик свариваемых изделий и нелинейности их 3D геометрии. Рассмотрены материалы с внутренней структурой и наличием многих границ раздела (пористые, слоистые, ячеистые). При разработке программных средств численного решения поставленной задачи использовали объектно - ориентированный подход, позволивший добиться хорошей информационной согласованности всех подсистем внутри программной среды и создать удобный пользовательский интерфейс для решения прямых и обратных задач проектирования технологических задач сварки плавлением. Решение прямых задач предполагает определение размеров сварного шва и зон структурно фазовых переходов при заданных режимах сварки для заданных образцов. При решении обратных задач возможен подбор рациональных режимов сварки, обеспечивающих некоторые наперед заданные характеристики свариваемых материалов.

Разработаны алгоритмические и эвристические предписания, позволяющие решать большой круг прикладных задач автоматизированного проектирования, как непосредственно указанных технологий сварки плавлением, так и получения новых материалов с применением сварки плавлением.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ №16-19-10010П в соответствии с планом работ 2019 года.

ЦИФРОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Р.А. КРЕКТУЛЕВА, Ю.Н. САРАЕВ, В.М. СЕМЕНЧУК, Р.О. ЧЕРЕПАНОВ¹, Р.О. БЕЗГИНОВ²

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск,

¹Томский научный центр СО РАН, г. Томск,

²ООО «Газпром трансгаз Томск», г. Томск,

E-mail: rakrekt@mail.ru

В настоящее время сварные конструкции из труб малого диаметра широко применяются в промышленном производстве (нефтегазовая отрасль, химическое производство, машиностроение и др.), для создания различного спектра изделий бытового назначения (металлической мебели, для оформления уличных рекламных панно, для создания элементов заграждения и т.д), а также в различного рода приборах и оборудовании (прямые врезки в трубопроводы для установки манометров, обвязка крановых узлов, импульсные трубки для управления задвижками). К изделиям бытового назначения помимо соответствующих эксплуатационных требований качества также предъявляются требования соблюдения эстетичного внешнего вида продукции.

Надо отметить, что в литературе вопросу сварки криволинейных поверхностей малого диаметра уделяется недостаточное внимание. Хотя известно, что при формировании сварного шва в таких изделиях наблюдается заметный перегрев металла по сравнению со сваркой плоских образцов такой же толщины. Считается, что перегрев неизбежен из-за низкого рассеивания теплоты внутри свариваемых трубок. По этой причине для изготовления ответственных конструкций относительно малых размеров вместо сварки нередко применяют более затратные технологии механической обработки (точение, фрезерование, сверление и другие), например, при изготовлении подшипников.

Целью данной работы является построение расчетной модели визуализации формирования криволинейных сварных соединений, а также выявление влияния кривизны поверхности на подбор режимов сварки. Рассмотрена сварка труб из стали 09Г2С по ГОСТ 19281-89 в сравнении со сваркой пластин. Расчеты выполнены для сварки аргонодуговым способом в защитном газе (Ar) по ГОСТ 2246-70. Для создания криволинейных моделей сварки использовано специализированное программное обеспечение, разработанное и апробированное авторами данной работы.

Для оценки достоверности результатов расчета в работе выполнены натурные эксперименты.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ №16-19-10010П в соответствии с планом работ 2019 года.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО КОМПОЗИТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ИЗГИБ

Т.А. КРЫЛОВА, Ю.А. ЧУМАКОВ

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
Email: kta@ispms.tsc.ru

Одним из перспективных способов нанесения упрочняющих покрытий является метод электронно-лучевой наплавки вне вакуума. Данная технология основана на использовании ускорителя релятивистских электронов. Метод позволяет получать наплавленные покрытия с однородной структурой, обладающие повышенной твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью и практически полным отсутствием трещин, раковин и микропор [1].

На сегодняшний день имеется достаточно большое количество исследований по определению упругих и прочностных характеристик покрытий, полученных методом плазменного и газотермического напыления, лазерной и электронно-лучевой наплавкой и другими методами [2, 3]. В настоящее время работ, посвященных исследованию прочностных свойств покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки, достаточно мало [4]. Для широкого внедрения покрытий требуются глубокие знания в области конструктивной прочности в различных условиях нагружения. Опыт их применения еще не велик, а влияние различных факторов изучено мало.

Целью работы явилось определение механических свойств композитов, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси ($\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{TiC}$) на Ст.3. Определяемыми характеристиками были предел прочности и стрела прогиба.

В данной работе было получено пять композитов соответствующих различным скоростям перемещения (v) образцов под пучком, энергиям облучения (W) и толщинам наплавленных слоев (таблица 1).

Таблица 1 Режимы обработки покрытий

№	1	2	3	4	5
$v, \text{см/с}$	9,5	8,0	7,0	0,6	0,55
$W, \text{кДж/см}^2$	7,4	8,8	10,0	11,7	12,7
Толщина наплавленного слоя, мм	1,7	1,3	1,5	3,7	4

Испытания на трехточечный изгиб (ГОСТ 14019-03) проводили на установке Инстрон-1185 с автоматической записью диаграмм «нагрузка P –прогиб f ». Скорость испытания составляла 0,5 мм/мин. Испытания на изгиб проводили до появления первой трещины в растянутой зоне образца с наплавленным слоем.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, Н, L — расстояние между опорами, мм, b — ширина образца, мм, h толщина образца, мм.

По экспериментальным данным были получены диаграммы зависимости приложенной нагрузки P от прогиба рис. 1. Согласно формуле (1) определены пределы прочности для образцов по максимально приложенной нагрузке.

Анализ диаграмм, полученных при испытаниях образцов с наплавленными композитами на трехточечный изгиб, показал, что образцы 1, 3, 4 и 5 обладают повышенной пластичностью и прочностью. Композиция с покрытием 5 является самой прочной $\sigma_{\text{изг}} = 877,128$ МПа. Максимальная пластичностью со значением $f_{\text{пл}} = 1,256$ мм у образца 1. Образец 2, обладая некоторым запасом пластичности, является самым хрупким, максимальная нагрузка на кривой деформации составляет $\sigma_{\text{изг}} = 677,124$ МПа.

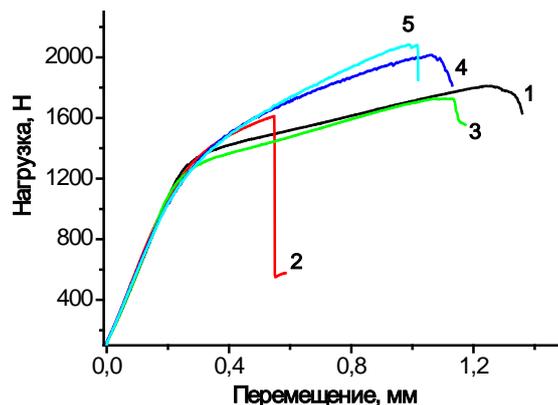


Рисунок 1 - Диаграммы зависимости приложенной нагрузки P от прогиба, полученные при испытании на трехточечный изгиб образцов с различной толщиной покрытия

Визуальный осмотр образцов после испытаний на изгиб до появления первой трещины показал, что композит с покрытием 2 ломается с образованием одной трещины проходящей сквозь все покрытие и по ширине и по толщине. Трещина развивается под действием сравнительно низких напряжений, но хрупко или квазихрупко. Переходя в основной металл Ст.3 магистральная трещина разветвляется на несколько мелких. Это связано с тем, что Ст.3 пластична. Ст.3 способствует торможению и прекращению развития трещин. В образцах 1, 3, 4 и 5 наблюдаются только зарождения трещин. Покрытия деформируются при повышенных нагрузках рисунок 1 до образования одной извилистой трещины, обладая при этом некоторым запасом пластичности, что свидетельствует квазивязкому разрушению.

В дальнейшем необходимы фрактографические исследования картины разрушения - излома, установление взаимосвязи между механическими свойствами, структурой и микротвердостью наплавленных покрытий.

Таким образом, метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки позволяет получать покрытия с различной толщиной наплавленного слоя. В зависимости от режима обработки покрытия имеют разные прочностные свойства. Механические испытания композиций с покрытием на трехточечный изгиб при комнатной температуре показали, что наплавка порошковой смеси ($Cr_3C_2 + TiC$) на стальную подложку позволяет повысить предел прочности в 4,5-6 раз по сравнению с пределом прочности Ст.3 до разрушения.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020, проект № 23.2.1

Авторы выражают благодарность Голковскому Михаилу Гедалиевичу (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН) за оказанную помощь в проведении электронно-лучевой наплавки.

Список литературы

1. Фоминский Л.П., Казанский В.В. Наплавка порошковых покрытий пучком релятивистских электронов // Сварочное производство. – 1985. – № 5. – С. 13-15.
2. Башта, А.В. Механические характеристики прочности приповерхностных слоев конструкционной керамики [Текст] / А.В. Башта // Вісник НТУ «ХТУ». – 2012. – № 48 (954). – С. 15-24.
3. Панин С.В., Белоцерковский М.А., Сейфуллина М.П., Почивалов Ю.И., Овечкин Б.Б. Исследование особенностей развития деформации на мезоуровне и разрушения композиций с напыленными покрытиями при трехточечном изгибе // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 2. – С. 91-104.
4. Полетика И.М., Голковский М.Г., Крылова Т.А., Перовская М.В. Структура и свойства хромсодержащих покрытий, полученных методом электронно-лучевой наплавки в атмосфере // МиТОМ. – 2009. – № 3. – С. 15-22.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СВАРОЧНЫХ И НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р.Е. КРЮКОВ

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк
E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

Актуальность

Физико-химические свойства металла сварного шва и наплавленного валика, при прочих равных условиях, зависят от типа и морфологии неметаллических включений. Основными раскислителями являются кремний, марганец и алюминий, образующие при соединении с кислородом различные оксидные включения, которые в связи со скоротечностью процесса сварки не всегда успевают всплыть из металла свариваемого шва и ассимилироваться шлаком, что в свою очередь приводит к снижению уровня требуемых механических свойств. Единственным используемым раскислителем, не приводящим к образованию неметаллических включений является углерод. При использовании в качестве раскислителя углерода реакции проходят с образованием газообразных продуктов соединений CO и CO₂, легко удаляемых из металла и не загрязняющих металл шва неметаллическими включениями. При этом соединения CO и CO₂, за счет высокого давления выделения способны оттеснять атмосферные газы из зоны сварочной дуги, причем образующиеся пузыри CO и CO₂ удаляют и содержащиеся в капле газы – водород и азот. Актуальной задачей является разработка новых углеродсодержащих сварочных материалов для сварки и наплавки (флюсы, флюсовые добавки, порошковые проволоки), обеспечивающих гарантированное получение требуемого нормативными документами комплекса физико-механических свойств сварных и наплавленных металлоизделий.

Цель - обоснование принципов выбора, использования, производства и создания углеродсодержащих флюсов, добавок к флюсам и порошковым проволокам, используемым при сварке и наплавке.

Результаты

–Проведено теоретическое обоснование механизмов протекания в сварочной ванне реакций восстановления оксидов FeO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, BaO, SrO, Cr₂O₃, с использованием C, CO, CO₂, Si, Mn, Al, а также влияние углерода на качество сварного шва и наплавленного валика.

–Проведены расчеты стандартных энергий Гиббса и определены условия взаимодействия фторсодержащих соединений Na₃AlF₆, SiF₄, Na₂SiO₃, CaF₂, с водородом при использовании углеродсодержащих сварочных флюсов и углеродсодержащих порошковых проволок.

–Теоретически обоснована целесообразность создания углеродфторсодержащих добавок к сварочным флюсам, обладающих рафинирующими и газозащитными свойствами.

–Показана целесообразность создания сварочных флюсов с высокой основностью и возможность использования ковшевых шлаков электросталеплавильного производства при изготовлении флюсов.

–Определена целесообразность использования марганецсодержащих техногенных отходов ферросплавного производства с углеродсодержащим материалом для изготовления флюсов и порошковых проволок.

–На основании экспериментальных данных предложены математические модели-регрессии, описывающие влияние химического состава на твердость и износ наплавленного слоя.

–Доказана возможность повышения прочностных механических свойств, а особенно ударной вязкости металла сварного шва или наплавленного валика, при снижении уровня оксидных неметаллических включений (концентрации кислорода), а также уменьшении содержания водорода и азота в металле сварного шва при введении углеродсодержащих добавок во флюс или порошковые проволоки.

–Показана положительная роль введения во флюсы барий- стронциевых составляющих в связи с уменьшением загрязненности неметаллическими включениями.

–Разработаны термодинамические принципы прямого легирования – восстановление с использованием углерода, кремния, марганца из соответствующих оксидов марганца, хрома, вольфрама.

–Разработаны технологии сварки резервуаров для нефтепродуктов в северном исполнении с использованием смеси флюсов и добавки АНК на основе мрамора и порошка ферросилиция (патенты РФ 2465108, 2467853).

–Разработаны, защищенные патентами РФ углеродсодержащие сварочные и наплавочные флюсы, флюс-добавки на основе техногенных металлургических отходов. Созданы флюс-добавки к сварочным флюсам, обладающие рафинирующими и газозащитными свойствами на основе пыли газоочистки алюминиевого производства (патенты РФ № 2484936, 2564801), барий-стронциевого карбоната (патенты РФ № 2623982, 2625509). Разработаны флюсы на основе марганецсодержащих техногенных отходов ферросплавного производства (патенты РФ №. 2576717 , 2579412, 2643027, 2643026), а также флюсы с высокой основностью на основе ковшевых шлаков электросталеплавильного производства (патенты РФ № 2566235, 2566236, 2625153, 2492983).

–Разработаны, защищенные патентами РФ, наплавочные порошковые проволоки для работы при высоких температурах и в условиях высокого абразивного износа с использованием углеродфторсодержащих соединений для удаления водорода из наплавляемого валика и восстановления из оксидов вольфрама (патенты РФ № 2623981, 2579328)

–Созданы новые наплавочные проволоки на основе принципов прямого легирования на базе оксидов марганца и хрома (патент РФ 2661126).

–Разработаны новые, защищенные патентами РФ наплавочные проволоки для ремонта горношахтного оборудования (2632505, 2641590).

–Результаты внедрены в условиях АО «НЗРМК им. Н.Е. Крюкова» (г. Новокузнецк)

Выводы

Проведено обоснование принципов выбора, использования, производства и создания углеродсодержащих флюсов, добавок к флюсам и порошковым проволокам, используемых при сварке и наплавке.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЛОЯ

М.А. КУЗНЕЦОВ¹, М.А. КРАМПИТ¹, А.Г. КРАМПИТ², А.А. ЗЕЛЕНКОВСКИЙ¹

¹Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Юрга

²АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Email: savage_jawa@mail.ru

В современной промышленности все более актуальным становится изготовление металлических изделий сложной формы при помощи аддитивных технологий. Реализация процесса изготовления возможна за счет применения электродуговой наплавки [1, 2]. Наплавка концентрированным источником энергии при высокой производительности процесса, позволяет реализовать принцип аддитивного производства, а именно послойного формирования объемных конструкций [3, 4]. Получение металлических изделий наплавкой происходит за счет плавления порошка или проволоки [5].

Для проведения экспериментальных исследований по влиянию режимов выращивания на геометрические параметры слоя было произведено электродуговое послойное выращивание плавящимся электродом с использованием разработанного 3D-принтера, схема которого представлена [6]. В качестве материала для выращивания использовалась сварочная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм.

Электродуговое послойное выращивание происходило по следующей технологии. Создавалась компьютерная 3D модель изготавливаемого изделия посредством CAD систем, которая в дальнейшем разбивалась на слои. Слои формировались на подвижном столе, обеспечивающем точное перемещение по заданной траектории по координатам X, Y и движущейся горелки, обеспечивающей точное позиционирование по координате Z в результате плавления проволоки и подплавления поверхности подложки или предшествующего слоя. Электродуговое послойное выращивание осуществлялось на следующих режимах, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы электродугового послойного выращивания

Параметр	Стандарт	SpeedArc	Импульс	Двойной импульс	SpeedPulse
Сила тока, А	63	70	38	30	33
Напряжение, В	21	18	26	30	26
Скорость подачи проволоки, мм/с	38,5	30,3	26,5	20,2	23,5
Скорость выращивания, мм/с	200	200	200	200	200

Слои выращивались по пяти различным вариантам: №1 – выращивание на режиме «стандарт»; №2 – выращивание на режиме «speedArc»; №3 – выращивание на режиме «импульс»; №4 – выращивание на режиме «двойной импульс»; №5 – выращивание на режиме «speedpulse».

На каждом образце для определения геометрических параметров слоя были выполнены шлифы. При изготовлении шлифов использовались механическая шлифовка, механическая полировка на алмазной пасте АСМ 10/7 НВЛ и химическое травление в 4% спиртовом растворе азотной кислоты.

Определения геометрических параметров слоя производилась путем измерения высоты усиления слоя, ширины слоя и глубины проплавления слоя. Геометрические параметры слоев, выращенных на различных режимах представлены на рисунке 1.

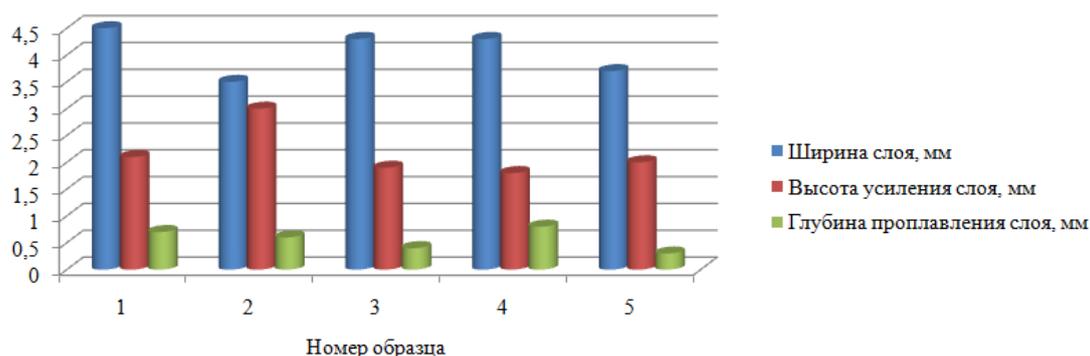


Рисунок 1 – Геометрические параметры, выращенных слоев

Выводы: Установлено, что наиболее рациональным режимом для электродугового послойного выращивание является режим «speedArc». Так как при электродуговом выращивание необходимо, что бы выращенный слой имел максимальную высоту усиления и минимальную ширину. Это позволит получать металлические изделие с более точными размерами и с минимальной последующей механической обработкой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00036.

Список литературы

1. Жуков В.В., Григоренко Г.М., Шаповалов В.А. Аддитивное производство металлических изделий (обзор) // Автоматическая сварка.– 2016. – № 5-6. – С. 148-153.
2. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Ткачук В.И., Пелешенко С.И., Коротенко В.В., Бабич А.А. Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий // Автоматическая сварка.– 2016. – № 5-6. – С. 127-134.
3. Ding D.H., Pan Z.X., Cuiuri D., Li H.J. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Oct. – P.465-481.
4. Taminger K.M., Hafley R.A. Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing // 139 specialists meeting on cost effective manufacture via net shape processing. Amsterdam (The Netherlands): NATO. – 2006. – P.16.1-16.10.
5. Garff K.F., Short M., Norfolk M. Very high power ultrasonic additive manufacturing (vhpuam) for advanced materials // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. – 2010. – P.82-89.
6. Крампит М.А., Кузнецов М.А. Проектирование 3-D принтера для электродугового послойного выращивания металлических изделий // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2018. – С. 151-153.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО ПЯТНУ НАГРЕВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

С.О. КУРАШКИН, В.Д. ЛАПТЕНОК, А.В. МУРЫГИН, Ю.Н. СЕРЕГИН

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева,
г. Красноярск
E-mail: ius_ceregin@mail.ru

Управление плотностью распределения энергии электронного пучка по пятну нагрева, реализуемое путем использования различных траекторий сканирования позволяет существенно повысить качество сварных соединений. Для оптимизации процесса электронно-лучевой сварки предложены траектории классического растра, синусоидального растра и усеченного растра. Для траекторий сканирования получены аналитические выражения и семейства расчетных характеристик плотности распределения энергии электронного пучка по пятну нагрева. Полученные характеристики позволяют более осмысленно подходить к оптимизации процесса электронно-лучевой сварки различных материалов.

Методика выбора формы развертки электронного луча до настоящего времени не разработана. В то же время накоплено довольно большое количество экспериментальных данных [1]. Наиболее широко используются следующие развертки пучка: продольная [2], х-образная [3], круговая и эллиптическая [4], дуга и скоба [5].

Задача этого исследования заключается в получении плотности распределения энергии сканирующего электронного пучка по пятну нагрева. Она характеризует распределение энергии в сварочной ванне. Распределение энергии описывается нормальным законом, который характеризуется плотностью вероятности вида [6]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2 * \pi}} * \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2 * \sigma^2}\right), \quad (1)$$

где x – координата по оси абсцисс, m – математическое ожидание, σ – среднеквадратичное отклонение, характеризующее диаметр электронного пучка, концентрацию энергии в нем.

Для того чтобы при построении характеристик плотности распределения энергии по пятну нагрева не учитывать конкретное значение среднеквадратичного отклонения введем безразмерные координаты и амплитуды сканирования пучка по этим координатам:

$$\bar{y} = \frac{y}{\sigma}$$

где y – координата вдоль стыка, σ – среднеквадратичное отклонение, \bar{y} – безразмерная координата вдоль стыка. В системе безразмерных координат $\sigma=1$.

$$\bar{A} = \frac{A}{\sigma}$$

где A – амплитуда, \bar{A} – безразмерная амплитуда.

Сканирование в виде классического растра, при этом движение по координате вдоль стыка осуществляется по односторонней пиле, описываемой кусочно-линейной функцией:

$$y = k * t + m, \quad (2)$$

где t — независимая переменная, k и m — некоторые числа, а при условии, что, $k = 1$, за время $t = [-1; 1]$ при периоде T , график будет в виде пилы.

При изменении математического ожидания в формуле (1), смещается график относительно его центра. Следовательно, вместо математического ожидания, можно подставить необходимое нам выражения, для растра – это линейная функция (2). Так же необходимо проинтегрировать полученное выражение. Получим следующую формулу:

$$W(\bar{y}) = \int_{-1}^1 \frac{1}{\sigma * \sqrt{2 * \pi}} * \exp\left(-\frac{(\bar{y} - (\bar{A}_y * k * t + m))^2}{2 * \sigma^2}\right) dt$$

где $\bar{A}_y \in [0;25]$, $k = 1$, $m = 0$, $y \in [-30;30]$.

На рисунке 1 показана фигура при нормальном распределении энергии для случая траектория сканирования электронного пучка в виде раstra вдоль стыка.

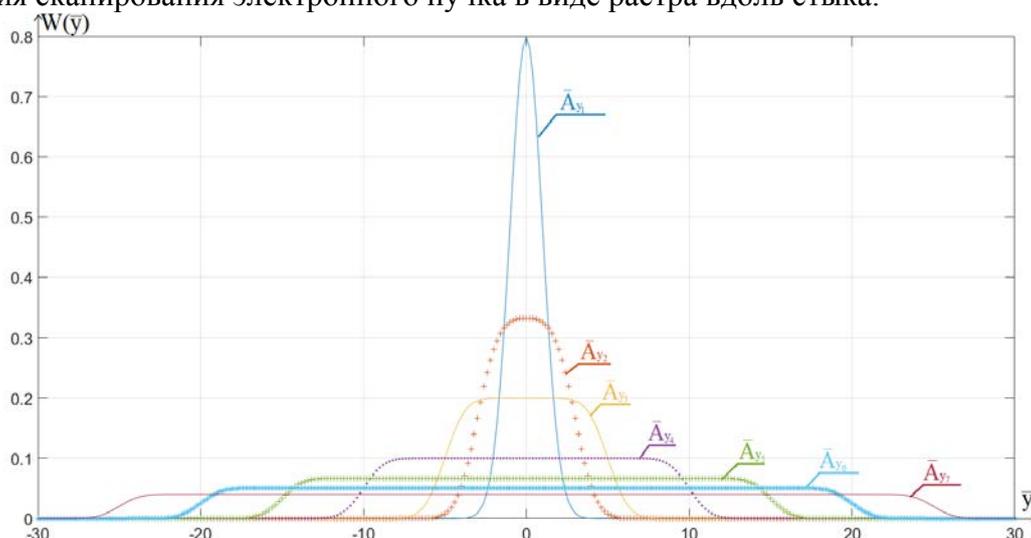


Рисунок 1 – Нормальный закон распределения при растровом сканировании:

$$\bar{A}_{y_1} = 0; \bar{A}_{y_2} = 3; \bar{A}_{y_3} = 5; \bar{A}_{y_4} = 10; \bar{A}_{y_5} = 15; \bar{A}_{y_6} = 20; \bar{A}_{y_7} = 25$$

Для того чтобы воспользоваться полученными расчетными характеристиками, необходимо перейти от безразмерных координат к размерным координатам, для этого необходимо провести следующие действия: $y = \bar{y} * \sigma$; $A = \bar{A} * \sigma$

Выводы. Для исследований по оптимизации процесса электронно-лучевой сварки целесообразно использовать сканирования электронного пучка в виде раstra, позволяющего получить устойчивую полость проплавления и высокое качество сварных соединений. Предложенные формы сканирования целесообразно запрограммировать в блоке управления разверткой электронного пучка.

Список литературы

1. Щербakov А.В., Родякина Р.В., Новочеркасов В.В., Ластовирия В.Н. Системы управления электронно-лучевых установок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studme.org/116096/tehnika/sistemy_upravleniya_elektronno_luchevyh_ustanovok
2. Акопьянц К.С., Нестеренко В.М. Электронно-лучевая сварка сталей толщиной до 600м с продольными колебаниями луча // Автоматическая сварка. – 2002. – № 9. – С. 3-5.
3. Беленький В.Я. Развертка электронного луча по х-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при ЭЛС // Автоматическая сварка. – 1986. – №9. – С. 35-37.
4. Effects of process parameters on centerline solidification in EB weld / Y. Komiro, C.S. Punshon, T.G. Gooch, P.S. Blakaley // Metal Constr. – 1986. – № 2. – P. 104-111.
5. Пряхин Е.И., Шаронов Н.И. Основные положения и проблемы технологии ЭЛС применительно к изготовлению конструкций из алюминиево-магниевых сплавов // Записка Горного Института. – 2018. – Т. 299. – С. 84-91. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.84
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Высш. шк., 1999 – 576 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ТИТАНОВЫХ ПЛАСТИН В МИКРО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

К.А. КУРГАН¹, А.М. УСТИНОВ¹, К.А. БЕЗУХОВ¹, А.А. КЛОПОТОВ^{1,2}, Ю.А. ВЛАСОВ¹, Ю.А. АБЗАЕВ¹, А.И. ПОТЕКАЕВ¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

E-mail: bezuhov_k@mail.ru

В настоящее время, несмотря на значительные достижения в области теории и практики методов сварки применительно к трудносвариваемым новым материалам остается ряд нерешенных проблем. К их числу можно отнести проблему сварки титановых сплавов с субмикрокристаллической структурой. Известно, что особенности структурных и фазовых превращений при сварке титановых сплавов связаны с высокими скоростями нагрева и охлаждения, а также присущими для титановых сплавов полиморфными $\alpha \rightarrow \beta$ - превращениями. Для данного класса материалов, помимо других факторов, наиболее значительное влияние на механические свойства сварного шва в сплавах в субмикрокристаллическом состоянии оказывают структурно-фазовые изменения, происходящие в процессе сварки. Минимизировать эти изменения можно при помощи электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Поскольку можно в широких пределах варьировать концентрацию мощности в зоне воздействия электронного пучка и высокой эффективности вакуумной защиты при формировании сварного шва.

В данной работе представлены результаты исследований распределений деформационных полей на поверхности в области сварного шва в титановом сплаве ВТ1-0 в микро- и субмикрокристаллическом состояниях при растяжении, полученных при помощи визуализации методом корреляции цифровых изображений

Изучение распределений деформационных полей в области сварного шва, полученного электронно-лучевой сваркой титанового сплава ВТ1-0 в микро- и в субмикрокристаллическом состояниях проводили при помощи цифровой оптической системы Vic-3D.

На полученных картинах распределений деформационных полей на начальных стадиях деформации по всему сварному образцу в микро- и в субмикрокристаллическом состояниях установлено, что на поверхности образца существуют области деформации растяжения и сжатия. Выявлено, что при растяжении сварных образцов сплава ВТ1-0 в микро- и в субмикрокристаллическом состояниях основным механизмом пластической деформации является сварной шов.

РИСК-АНАЛИЗ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.М. ЛЕПИХИН, Н.А. ЧЕРНЯКОВА

Красноярский филиал Института вычислительных технологий СО РАН, г. Красноярск

Email: aml@ict.nsc.ru

При проектировании сварных конструкций особая роль отводится методам и технологиям вычислительного моделирования и анализа предельных состояний, возникающих при наиболее сложных режимах эксплуатации. Эти методы и технологии основываются на сочетании традиционных детерминированных и развивающихся новых вероятностных подходов. К настоящему времени сформировался многоуровневый комплекс расчетных параметров анализа предельных состояний: «прочность $R_\sigma \rightarrow$ жесткость $R_\delta \rightarrow$ устойчивость $R_\lambda \rightarrow$ ресурс $R_{N,\tau}$ – надежность $P_{P,R} \rightarrow$ живучесть $L_{l,d} \rightarrow$ безопасность S ». Каждому параметру соответствует определенный практический результат в проектировании, изготовлении и эксплуатации сварных конструкций: «неразрушимость – сохранение размеров и формы – долговечность – отказоустойчивость – живучесть – риск аварий». Для высокоответственных сварных конструкций особое внимание уделяется оценкам риска хрупких разрушений. Риск R рассматривается как количественная мера безопасности, определяемая по заданным вероятностным характеристикам P нагрузок Q , числа циклов N и времени τ нагружения, прочности $R_\sigma, R_\delta, R_\lambda, R_{N,\tau}, R_K$ и размеров дефектов l :

$$R = F_P\{P | (Q, N, \tau); (R_\sigma, R_\delta, R_\lambda, R_{N,\tau}); l\}.$$

В предлагаемом подходе к оценке риска характеристики прочности определяются с учетом возможных видов предельных состояний (ПС). В качестве основных рискообразующих факторов рассматриваются: интенсивности рабочих напряжений, уровень остаточных напряжений, жесткость конструкции, размеры технологических и эксплуатационных дефектов. Риск определяется для трех групп ПС: основные предельные состояния (ОПС), дополнительные предельные состояния (ДПС) и аварийные предельные состояния (АПС). Оценка риска достижения ОПС проводится в рамках классических теорий прочности с использованием моделей и методов механики деформируемого твердого тела, теории упругости и пластичности. Риск достижения ДПС определяется на основе анализа полей локальных упругопластических напряжений и деформаций и деформационных критериев разрушения. Риск достижения АПС определяется с использованием аппарата линейной и нелинейной механики разрушения с учетом экстремальных нагрузок и воздействий.

При оценках рисков используется гибридный подход, учитывающий вектор $A = \{a_i\}^T, i = 1, n$ случайных переменных a_i с функциями плотностей распределения вероятностей $f(a_i)$, и вектор $B = \{b_j^l\}, j = 1, m$, интервальных переменных с заданными нижними \underline{b} и верхними \bar{b} границами $b_j^l = [\underline{b}, \bar{b}]$. С учетом этого определяются нижние и верхние оценки интервала риска $R = [R_{min}, R_{max}]$ для заданных областей случайных и интервальных переменных. Такой подход позволяет получить более адекватные оценки риска, учитывающие особенности исходной информации. С использованием изложенного подхода возможна оценка защищенности технических систем от разрушений сварных конструкций по критериям рисков тяжелых аварий и катастроф на основе имеющейся информации E . Защищенность Z технической системы по критериям рисков рассматривается как выполнение условия, при котором расчетный риск $R(E)$ меньше некоторого допустимого значения R_0 :

$$Z = \{E | R(E) < R_0\} \text{ или } Z = \{E | R(E) - R_0 < 0\}.$$

С учетом этого предложена следующая классификация уровней защищенности технических систем по критериям рисков: безусловно защищенные технические системы, для которых выполняется условие $R_{min} \leq R_{max} \leq R_0$; условно защищенные технические системы, для которых $R_{min} \leq R_0, R_{max} \geq R_0$; незащищенные технические системы, для которых $R_0 < R_{min} \leq R_{max}$.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А.В. ЛИХАЧЕВ^{1,2}, Т.С. КИЙЧЕНКО¹, Н.А. ЛИХАЧЕВ¹

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск

²Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: ipm1@iae.nsk.su

Эффективным средством контроля степени изношенности инженерных конструкций, находящихся в эксплуатации, является рентгеновская томография, которая позволяет не только обнаружить, внутренние дефекты, но и оценить с высокой степенью точности их локализацию, размер и форму. Для инспекции трубопроводов была разработана следующая схема сканирования. Источник движется параллельно трубе, при этом излучение регистрируется неподвижной линейкой детекторов, находящейся с противоположной стороны. В лучевом приближении изображение распределения коэффициента ослабления в плоскости, проходящей через линейку и источник, можно реконструировать по формуле, [1]:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{s_2}^{s_1} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{f}_s(\omega)| \exp(i\omega(r_d(s-x)/y)) d\omega \right\} ds. \quad (1)$$

Здесь r_d – расстояние между источником и линейкой; $\tilde{f}_s(\omega)$ – преобразование Фурье от проекции $f_s(x)$, которая получается при логарифмировании данных, зарегистрированных линейкой, при фиксированном положении источника. На таких изображениях структуры растягиваются в направлениях, с которых проводится зондирование объекта. В частности, трещины, перпендикулярные поверхности трубы, оказываются на изображении длиннее, чем они есть на самом деле. В работе [1] было показано, что растяжение элемента структуры тем сильнее, чем больше его размер на проекции. Там же было установлено, что для мелких элементов этот размер на реальных проекциях существенно превосходит размер, который они имеют на модельных проекциях, вычисленных в лучевом приближении. Такая аномалия объясняется неидеальными свойствами регистрирующей системы.

В линейном приближении зарегистрированная проекция может быть выражена как

$$f_s(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_s^{(0)}(x') K(x-x') dx' + n(x). \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) – это свёртка лучевой проекции $f_s^{(0)}(x)$ с функцией $K(x)$, которая определяется свойствами оборудования; второе – случайная функция, описывающая шумы измерений. Согласно [2], для лучевой проекции имеет место оценка:

$$f_s^{(0)}(x) \approx \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{f}_s(\omega)}{\tilde{K}(\omega) + \alpha\omega^2} \exp(i\omega x) d\omega. \quad (3)$$

Здесь через α обозначен параметр регуляризации, который в общем случае определяется из свойств шумовой составляющей $n(x)$. В [1] был предложен способ экспериментального определения $K(x)$. Оказалось, что она хорошо аппроксимируется функцией Гаусса.

Точность оценки (3), а вместе с ней и точность решения исходной задачи – определения размера трещины – зависит от выбора значения параметра регуляризации. В настоящей работе вопрос о нахождении оптимальных значений α исследуется посредством численного моделирования. Вычислительный эксперимент был организован следующим образом. Трещина моделировалась прямоугольником, см. рис. 1,а. Вычислялось 500 лучевых проекций, которые сворачивались с гауссовым ядром, после чего к каждой из них добавлялся некоррелированный центрированный гауссов шум с постоянной дисперсией $\sigma^2 = \xi^2 \bar{f}^2$, где \bar{f} – среднее значение проекционных данных в отсутствие шума. Из полученных таким

образом функций $f_s(x)$ путём деконволюции (3) восстанавливались лучевые проекции, по которым проводилась томографическая реконструкция согласно (1). Ошибка вычислялась по формуле $\delta_l = (a_r - a)/a \times 100\%$, где a_r – длина трещины на полученном изображении; a – размер соответствующей стороны моделирующего её прямоугольника.

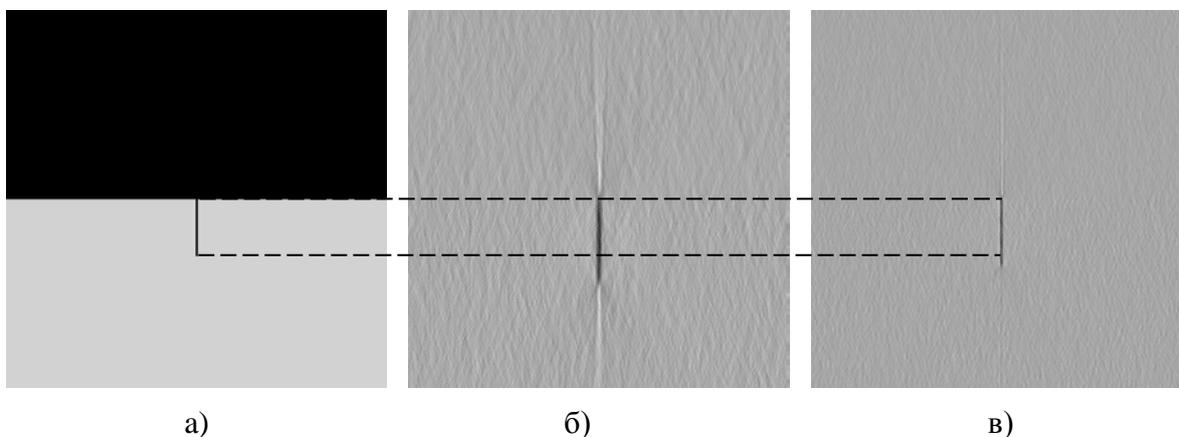


Рисунок 1 – а) Математический фантом; б) томограмма по проекциям, свёрнутым с гауссовым ядром, $\delta_l = 27.4\%$; в) реконструкции после деконволюции данных $\alpha=1.4 \cdot 10^{-5}$, $\delta_l = 11.2\%$

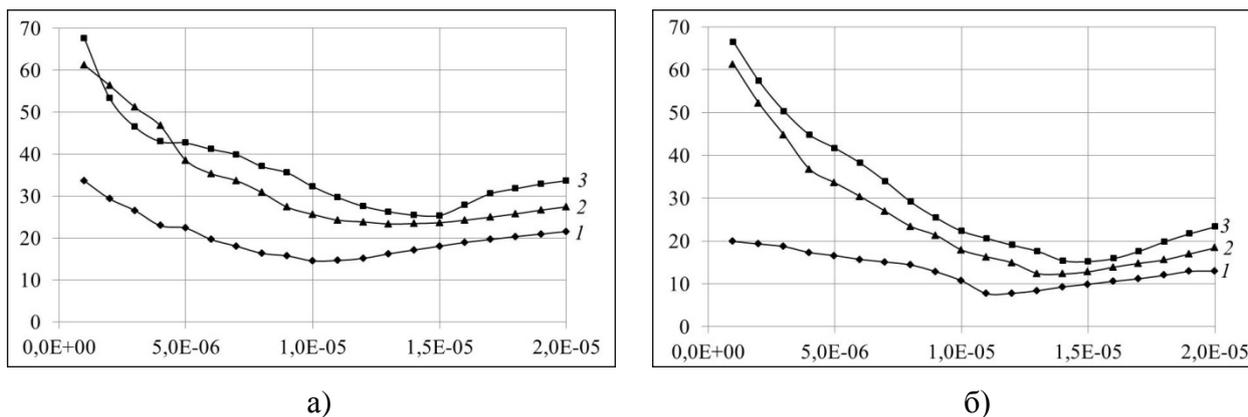


Рисунок 2 – Зависимости ошибки δ_l от параметра регуляризации α

Численное моделирование показало, что применение процедуры деконволюции (3) к проекционным данным уменьшает ошибку в определении длины трещины в 1.5 – 3.5 раза в зависимости от её ширины, угла обзора, уровня шума и других факторов. На рис. 2 представлены зависимости ошибки δ_l от величины α . Для рис. 2,а угол обзора составляет 30° , а для рис. 2,б – 60° . На рис. 2,а,б для кривых 1, 2 и 3 значение параметра ξ равно 0, 0.01 и 0.02. Примеры полученных томограмм приведены на рис. 1,б,в. Угол обзора равен 60° . Шум в проекционных данных соответствует параметру $\xi = 0.01$.

Список литературы

1. Likhachov A.V., Pickalov V.V., Ewert U., Redmer B. Influence of unsharpness on crack length evaluation with computerized tomography methods. // Industrial Process Tomography: Proceedings of the 2nd World Congress. – Hannover, 2001 – P. 711-718.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. 2-е издание. – М.: Наука, 1979. – 283 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОДОВ С ОСНОВНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Ю.И. ЛОПУХОВ¹, Г.К. ДАУМОВА², В.И. БОЧЕНИ¹

¹ Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан,

² Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

E-mail: julop@mail.ru

В российских и казахстанских нормативных документах предусматривается применение низководородных электродов УОНИ-13/55, используемых для производства ответственных металлоконструкций из низколегированных сталей. Однако эти электроды, ввиду низких технологических свойств, уже не отвечают современным требованиям качества в сравнении с зарубежными аналогами ведущих фирм дальнего зарубежья. Поэтому на Казахстанском рынке для сварки и ремонта сваркой трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, ответственных технологических аппаратов, транспортных магистралей и других промышленных ответственных объектах широко используются электроды известных зарубежных фирм ESAB, COBELCO, LINCOLN, BOCHLER, HYUNDAI и др.,

При разработке состава покрытия опытных электродов для сварки конструкций ответственного назначения на первом этапе была поставлена задача повышения сварочно-технологических свойств электродов УОНИ 13/55 с использованием местных компонентов и техногенных отходов.

Предложен состав электродного покрытия преимущественно для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, содержащий стандартную рецептуру электродов УОНИ 13/55, в состав которой дополнительно вводили опал-кварц-карбонатную глину (опытный №1) и дополнительно с глиной - техногенный отход (опытный №2). Результаты электронно-микроскопического исследования структуры опал-кварц-карбонатную глины и её спектральный состав выполнены с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390LV(рисунок 1,таблица 1).

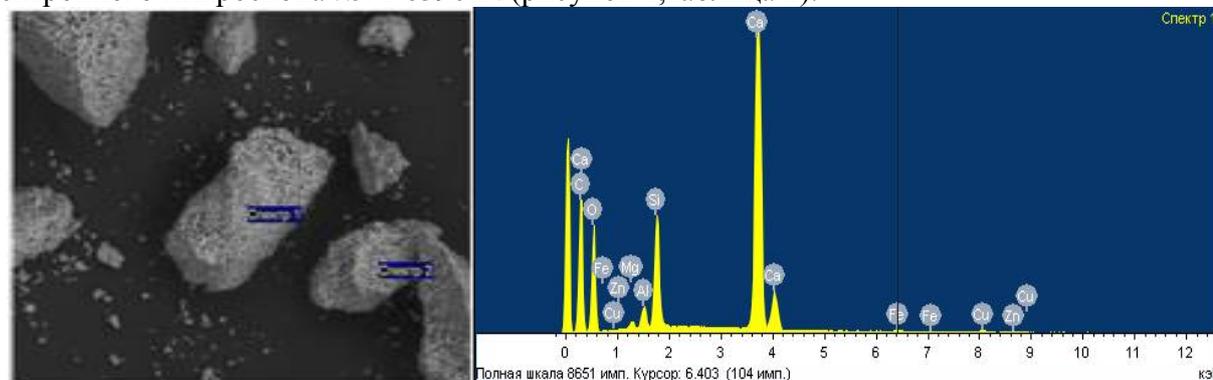


Рисунок 1 – Электронно-микроскопический снимок и спектральный состав природной бентонитовой опал-кварц-карбонатной глины

Таблица 1 – Элементный состав бентонитовой опал-кварц-карбонатной глины

Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe	Cu	Всего
Спектр 1	31.26	39.09	0.40	0.89	4.92	21.97	0.36	0.64	100
Спектр 2	28.79	45.59	0.38	0.69	3.45	19.70	0.24	0.69	100

Проведены сравнительные исследования сварочно-технологических свойств и механические испытания стандартными электродами УОНИ 13/55, опытными и импортными электродами для сварки углеродистых сталей (рисунок 2). Сравнительные испытания показали, что внешний вид сварочных валиков опытных электродов характеризуется

стабильностью формы геометрических размеров сечения и мелкочешуйчатой поверхностью (рисунок 2е, ж);

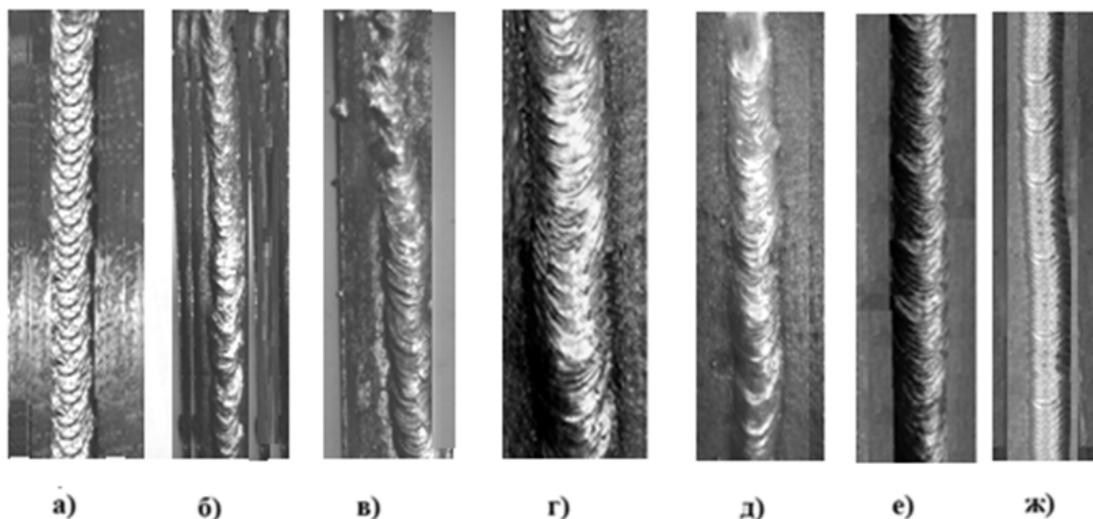


Рисунок 2 – Внешний вид валиков, наплавленных опытными и другими марками сварочных электродов для сварки углеродистых сталей: а) УОНИ 13/55 диаметром 4 мм производства ТОО «Электрод СК» (Казахстан); б) LB - 52U диаметр 2,6 мм с (Япония); в) S-7018.1 диаметр 2,6 мм (Южная Корея), МГМ – 50К диаметр 4 мм (Россия), «Арсенал» диаметр 4 мм (Р. Беларусь), е) опытные электроды диаметром 4 мм №1 с дополнительны введением в состав покрытия стандартных электродов УОНИ 13/55 бентонитовой опал-кварц-карбонатной глины; ж) опытные электроды диаметром 3 мм №2 с дополнительным введением в состав покрытия УОНИ 13/55 бентонитовой опал-кварц-карбонатной глины и техногенного отхода

Опытные электроды обеспечивали высокие технологические свойства:

- легкое возбуждение и стабильное горение дуги;
- бесконтактное возбуждения дуги при кратковременном разрыве дуги в процессе сварки в различных пространственных положениях;
- увеличение проплавляющей способности дуги за счет её сжатия кольцевым козырьком покрытия, образованным на торце электрода;
- отсутствие или ничтожно малое разбрызгивание на рабочих режимах сварки;
- мелкокапельный перенос электродного металла;
- отличную отделимость шлаковой корки с поверхности даже ещё не остывшего сварного шва.

Таблица 2 – Механические свойства наплавленного металла

	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²		
				KCV ₂₀	KCV ₋₂₀	KCV ₋₄₀
УОНИ 13/55	530	395	25		127	85
Опытный №1	545	410	36,6	380	263	129
Опытный №2	550	420	36,6	380	267	139

По результатам исследований были изготовлены в Казахстане на заводе ТОО «Электрод СК» полупромышленные партии опытных электродов, которые успешно прошли проверку на сварочно-технологические свойства на предприятиях Казахстана и в Компании «Ерсай», (Италия), работающей на Казахстанском рынке.

ДВУХСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ В ЭЛЕКТРОДАХ УОНИ 13/ 55

Ю.И. ЛОПУХОВ¹, Г.К. ДАУМОВА²

¹ Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан,

² Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

E-mail: julop@mail.ru

Основными недостатками электродов УОНИ-13/55 являются низкие сварочно-технологические свойства. С целью комплексного повышения сварочно-технологических свойств низководородных электродов УОНИ-13/55 и сохранением при этом показателей прочности, пластичности и хладостойкости исследовали сварочные электроды с двухслойным покрытием. Электрод для дуговой сварки (рисунок 1) содержит металлический стержень 1 и покрытие, состоящее из двух слоев.

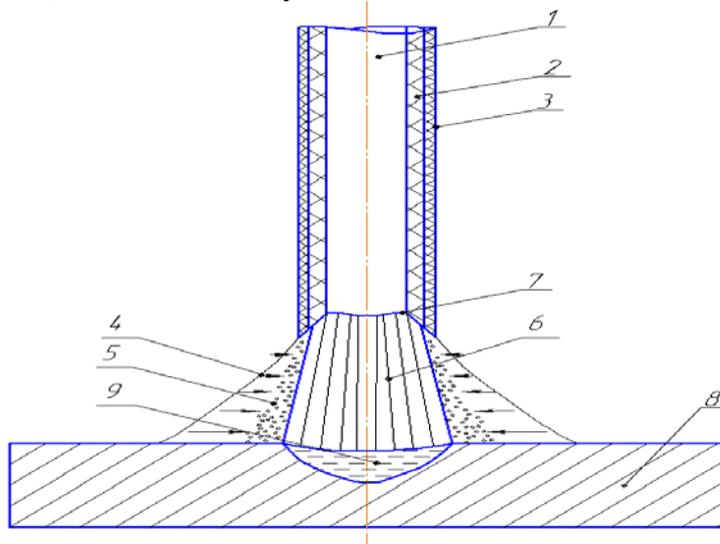


Рисунок 1 – Электрод с двухслойным покрытием

Внутренний слой 2 состоит шлакообразующих и газообразующих компонентов стандартной рецептуры покрытия электродов УОНИ-13/55. Для второго же наружного слоя 3 использовали бентонитовую глину 14 горизонта Таганского месторождения Восточно-Казахстанской области. Её элементный состав (масс. %): SiO_2 – 55,48; TiO_2 – 0,30; Al_2O_3 – 19,38; Fe_2O_3 – 4,40; CaO – 11,98; MgO – 2,18; K_2O – 0,51; Na_2O – 0,14; SO_3 – 0,32 [1]. Для изготовления электрода с двухслойным покрытием бентонитовую глину предварительно подвергали сверхизмельчению на вибромельнице и смешивали с жидким стеклом, а затем наносили на первый высушенный слой опрессовкой на стандартное покрытие электродов УОНИ 13/55.

В процессе горения дуги внутренний слой покрытия шлакообразующих и газообразующих компонентов торца электрода, находясь в центральной высокотемпературной зоне, более интенсивно испаряется и диссоциирует относительно наружного слоя, омываемого более холодной газовой атмосферой. Это приводит к замедлению скорости плавления активизирующих компонентов наружного слоя при переходе его в сварочную ванну и к образованию устойчивого равномерного по окружности козырька 7 на торце электрода по всему сечению покрытия. Козырёк препятствует распространению пара 4 активизирующих компонентов за пределы приэлектродной области дуги 6. Это увеличивает концентрацию пара 4 активизирующих компонентов в зоне горения дуги 6 и повышает контрагирование дуги 6, стабилизацию дугового промежутка, снижение продолжительности коротких замыканий и обеспечивает минимальное разбрызгивание. Причём при горении электрода, повышаются активизирующие свойства сверхмелкого бентонита на уровне наночастиц и, образуемые электроотрицательные ионы в составе пара 4, смешиваясь с положительными ионами шлакообразующих и газообразующих компонентов

2, контрагируют (сжимают) столб сварочной дуги 6 за счет электродинамических сил. При этом активное сечение столба дуги 6 уменьшается, и плотность тока в дуге возрастает. Это позволяет увеличить глубину проплавления свариваемого металла 8 и повысить производительность процесса сварки. Увеличение проплавляющей способности обусловлено ещё и тем, что при повышении плотности тока в столбе дуги 6 увеличиваются электродинамические силы, сжимающие газовый поток 5, что приводит к возрастанию скоростного напора плазмы дуги 6 на поверхность сварочной ванны 9.

Электронно-микроскопические исследования наплавленного металла, выполненные на растровом микроскопе JSM-6390LV показывают, что в наплавленном металле опытных электродов в сравнении с УОНИ 13/55 зарегистрировано более высокое содержание элементов-раскислителей Mn, Si, Ti с дополнительным присутствием Al, перешедшего из бентонита покрытия опытных электродов (рисунок 2, таблица 1).

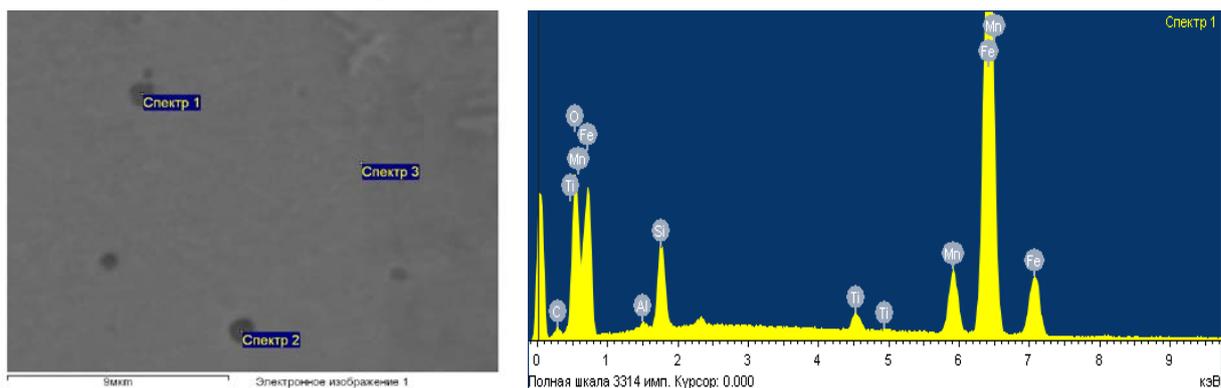


Рисунок 2 – Точечное сканирование элементного состава наплавленного металла электрода с двухслойным покрытием

Таблица 1 – Элементный состав наплавленного металла электрода с двухслойным покрытием

Спектры	O	Al	Si	S	Ti	Mn	Fe	Итог
Спектр 1	15.22	0.34	4.44		1.29	7.85	70.85	100.00
Спектр 2	12.92		3.84	0.23	0.69	4.45	77.87	100.00
Спектр 3	6.41					0.74	92.84	100.00

Глубина проплавления металла, сваренных стандартными электродами без наружного слоя активирующих компонентов, составило 2,5...2,8 мм, а проплавление образцов, сваренных опытным электродом со слоем активирующих компонентов, нанесенных на поверхность обмазки, слоя шлакообразующих и газообразующих компонентов, составило 4...4,5 мм.

Введение дополнительно в состав второго слоя покрытия электродов УОНИ 13/55 бентонитовой глины 14 горизонта Восточно-Казахстанской области позволяет обеспечить мелкокапельный перенос металла, существенно уменьшить разбрызгивание, повысить стабильность и ионизирующие свойства дуги горения дуги.

Список литературы

- 1 Инновационный патент РК №30939 Электрод для дуговой сварки (19) KZ (13) A4(11) 30939 от 15.03.2016 г., бюл. №3 / Лопухов Ю.И., Адрышев А.К., Хайруллина А.А., Даумова Г.К

ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС

А.Б. ЛЮХТЕР, И.С. ПЕЧНИКОВ, А.Н. ГОЦ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
E-mail: pechnikov@laser33.ru

Во время работы двигателя зеркало цилиндров подвергается абразивному и механическому изнашиванию. Механическое изнашивание зеркала гильзы цилиндра больше в верхней части, чем в нижней, так как в верхней части давление значительно выше. Когда в конце такта сжатия в цилиндре сгорает рабочая смесь, то резко повышается давление образовавшихся горячих газов, и первое компрессионное кольцо сильно прижимается к зеркалу цилиндра. В ВМТ скорость поршня снижается до нуля, масляная пленка выгорает, и первое поршневое кольцо вступает непосредственно в контакт с зеркалом цилиндра. При движении поршня вниз (в первый момент) происходит интенсивное изнашивание зеркала цилиндра и поршневого кольца [1]. Вследствие износа внутренней поверхности цилиндра наблюдается повышенный расход масла, прорыв газов в картер, снижение его мощности на 20-25% за счет снижения компрессии в цилиндре.

Устранить износ внутренней поверхности гильзы можно с помощью растачивания, хонингования, шлифования [1].

Предлагается же заменить технологию плосковершинного хонингования лазерным термоупрочнением. Лазерная закалка основана на быстром нагреве зоны обработки выше температуры фазового перехода и последующем охлаждении за счет теплоотвода во внутренние объемы материала. В результате в поверхностном слое образуется специфическая высокодисперсная структура, имеющая микротвердость в 2—4 раза превышающую твердость основы. Сам процесс закалки происходит за счет интенсивного отвода тепла вглубь металла - процесс самозакалки.

Лазерное термоупрочнение подразумевает под собой возможность обработки без оплавления поверхности – что исключает изменение шероховатости и необходимости в последующей механической обработке. Лазерная закалка позволяет снизить износ в парах сухого трения и абразивно-масляной среде. С точки зрения энергетических затрат, а также затрат на расходные материалы, трудозатрат, длительности технологического цикла лазерная обработка является наиболее эффективным методом упрочнения [2].

Эта технология имеет ряд преимуществ перед традиционными методами обработки:

- высокая концентрация и плотность теплового поля, которая подводится к поверхностному слою, позволяет проводить обработку на небольшую толщину без нагрева основного объема материала и изменения его структуры;

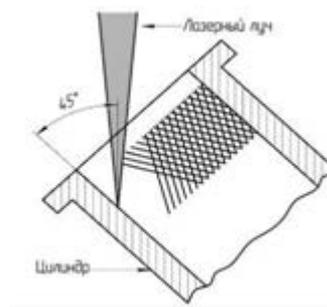
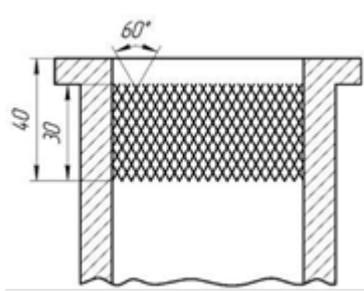
- нагрев и охлаждение поверхностного слоя детали с высокими скоростями при незначительном времени воздействия позволяет получить структуры и свойства обрабатываемой поверхности с высокими эксплуатационными характеристиками [3];

- высокая скорость обработки и полная автоматизация процессов;

- возможность обработки по сложным траекториям в труднодоступных местах деталей [3].

Работы по лазерному термоупрочнению внутренней поверхности ДВС (Рисунок 1) проводились на лазерном роботизированном комплексе, в состав которого входит: шестиосевой робот и двухосевой позиционер производства FANUC, иттербиевый волоконный лазер мощностью 5 кВт и сварочная голова производства IPG Photonics.

Проведены исследования по лазерному термоупрочнению внутренней поверхности цилиндра ДВС из чугуна СЧ20. Средняя твердость на поверхности после обработки составила 68,1 HRC, что на 53,8 % выше чем твердость исходного материала. Глубина упрочненного слоя – от 0,35 до 0,5 мм, что полностью соответствует ожидаемым результатам. Оплавление поверхности не наблюдается. Шероховатость поверхности детали не изменилась, что исключает дополнительную механическую обработку изделия.



Список литературы

1. Захаров Ю.А., Булатов Р.Р. Основные эксплуатационные дефекты гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Молодой ученый. – 2015. – № 5. – С. 148-150. – URL <https://moluch.ru/archive/85/15984/> (дата обращения: 22.04.2019).
2. Технология лазерной закалки https://www.irslasertech.ru/tehnologii/lazernoe_termouprochnenie.
3. Упрочнение деталей машин и элементов пар трения из коррозионностойких сталей с использованием лазеров последнего поколения / С. Д. Кузьмин / – 2017 – С. 186.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СТАЛИ ЧС-82

А.Б. ЛЮХТЕР П.А. ПАЛКИН В.А. ИЛЬИН

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
E-mail: victor33victor@mail.ru

Технология лазерной сварки стали ЧС-82 (04X14ТЗР1Ф) с содержанием бора 1,3-3,6%, может найти широкое применение для изготовления сварных изделий и труб с повышенными требованиями к поглощению нейтронного излучения для объектов атомной энергетики. Сварка легированной низкоуглеродистой феррит-аустенитной нержавеющей стали ЧС-82, производилась на пластинах толщиной 6 мм, с помощью лазерного излучения волоконного иттербиевого лазера под углом 120° друг к другу из заготовок, имеющих скос одного из торцов под углом 30°.

Сварное соединение (рисунок 1) стали ЧС-82, выполненного по технологии лазерной сварки, подвергалось металлографическим исследованиям и физико-механическим испытаниям.

Металлографические исследования показали: возможность формирования высококачественного сварного соединения, содержащего кинжальный, либо воронкообразный сварной шов без крупных дефектов, таких как поры и трещины. Сварной шов имеет кратер I с шириной 3,4 мм и гл глубиной 0,6 мм, головную часть с шириной 3,6 мм и глубиной 2,1 мм и основную часть шириной 1 мм и глубиной 4,8 мм.

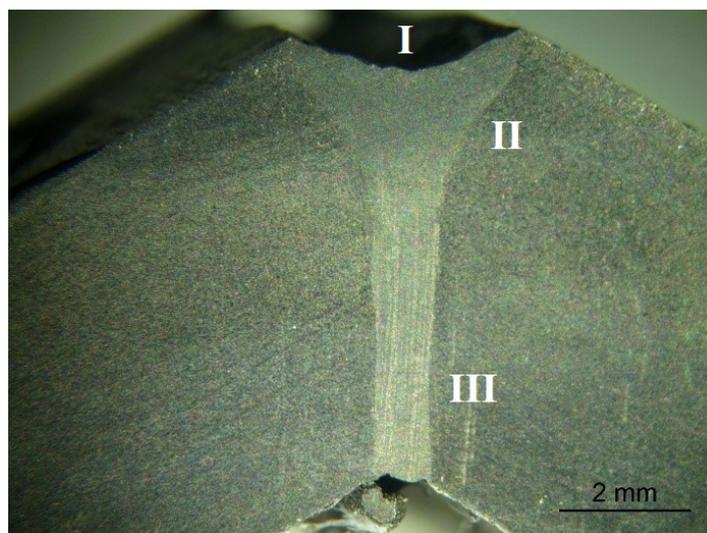


Рисунок 1 - Общий вид сварного соединения

Микроструктура сварного соединения включает в себя мелкозернистый преимущественно ферритный сварной шов высокой твердости, с боридами и карбидами, растворенными по границам зерен. Зона термического влияния содержит сравнительно плавный переход от мелкозернистой структуры к основному металлу изделия, при этом ширина самой зоны составила менее 300 мкм. Физико-механическим испытаниям образцов показали, что значения предела прочности сварного шва составили до 80% от предела прочности основного металла контрольного образца и составили ~ 430 МПа. Технология лазерной сварки стали ЧС-82, позволила получить качественные и равномерные по структуре сварные швы, минимальные зоны термического влияния и высокую повторяемость.

Список литературы

Григорьянц А.Г. и др. Разработка технологии лазерной сварки стали ЧС-82 с содержанием бора применительно к чехловым трубам для АЭС // Технология машиностроения. – 2015. – №. 10. – С. 29-34.

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

А.Б. ЛЮХТЕР, П.А. ПАЛКИН, А.В. ЗАВИТКОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир
E-mail: 3699137@gmail.com

Формирование наплавленных слоев из порошка жаропрочной стали распыляемого формирующими канальными модулями, и сплавляемого излучением волоконного иттербиевого лазера, в среде защитных газов: связано с высокими скоростями нагрева и охлаждения. Постановка задачи заключается в поиске оптимального баланса плотности мощности и скорости движения источника, при достаточном спекании слоев наплавки, при минимизации негативных явлений, таких как: порообразование и выгорание лигатуры. [1].

Задача может решаться как за счет изменения плотности мощности, так и технологически — использованием мультисканального сопла, повышающего спекаемость слоев наплавки, за счет формирования оптимального потока напыляемого порошка, без дополнительных тепловложений сверх установленных для монослоя наплавки [2].

Наплавляемые слои формировались лазерным роботизированным комплексом ЛРК-5 НОЦ ВЛТ ВлГУ, включающим питатель порошка АТ-1200; оснащенные специальным модулем 4-х сторонней подачи порошка с коаксиальным соплом и системой охлаждения (рис. 1 – слева). Наплавка осуществлялась на три типа подложек: жаропрочную, низкоуглеродистую и конструкционные стали.

После отработки режимов плотности мощности и скорости движения источника: использование коаксиального сопла, привело к значительному повышению сплошности наплавки, с дендритной структурой, и твердостью наплавки 25-30 HRC, в отсутствие межкристаллитной коррозии. Технология лазерной наплавки с 4-х канальным соплом была применена при восстановлении валов из конструкционной стали (рис. 1 – справа): наплавленные слои формировались при вращении изделия вокруг своей оси, без принудительного охлаждения.

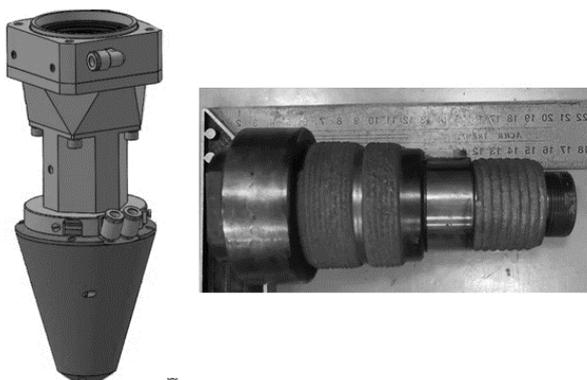


Рисунок 1 - Лазерная наплавка с мультисканальным модулем подачи порошка

При наплавке излучением иттербиевого лазера, с использованием ЛРК, с использованием 4-х канального сопла, взамен классического коаксиального позволит обеспечить значительное снижение дефектообразования и повысить сплошность наплавленных слоев.

Список литературы

1. Бирюков В.П., Фишков А.А., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Быковский Д.П., Петровский В.Н. Влияние режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на абразивную износостойкость покрытий // Photonics. – 2016. – № 3. – С. 32-43.
2. Морунов И.В., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Принцип лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов коррозионно-стойких сталей // Сварка. Реновация. Триботехника: тезисы докладов VII Уральской научно-практической конференции. – Нижний Тагил, 2017. – С. 27-31.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.В. ЛЮШИНСКИЙ, А.А. БАРАНОВ

АО «РПКБ», Московская область, г. Раменское

E-mail: nilsvarka@yandex.ru

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является одной из технологий, обеспечивающей получение качественных неразъемных соединений как из однородных, так и разнородных материалов, которые невозможно соединить сваркой плавлением, например, алюминиевый сплав Д16 и алюминиевые сплавы с медью. Применение данной технологии в современном авиационном приборостроении может дать положительный эффект за счет облегчения процесса изготовления корпусных деталей и биметаллических систем охлаждения, за счет сборки-сварки полностью обработанных заготовок из листового металла взамен фрезерной обработки из плиты. В части применения биметаллических систем охлаждения позволит повысить отвод избыточного тепла в процессе работы электронных компонентов комплекса, тем самым повысить ресурс и дать возможность дальнейшей его модернизации.

В АО «РПКБ» проводятся работы по изготовлению корпусных деталей из алюминиевых сплавов марок Д16 и АМг6 и биметаллических (Al + Cu) пассивных и комбинированных систем охлаждения. В работе используется специализированный инструмент и оборудование на базе модернизированного фрезерного станка TOS FA3V.

Работа проводилась в несколько этапов: 1. Определение диапазона технологических параметров для получения бездефектных сварных соединений алюминиевых сплавов и взаимосвязи параметров режима с прочностными показателями сварного соединения; 2. Отработка технологии изготовления корпусных деталей из алюминиевых сплавов; 3. Изготовление опытной партии корпусных деталей и их испытаний в составе габаритно-весовой модели изделия на соответствие требованиям ТУ; 4. Определения диапазона технологических параметров для обеспечения получения биметаллических Al-Cu сварных соединений; 5. Изготовление опытной партии деталей комбинированной системы охлаждения.

При исследовании технологических параметров режима сварки:

- для деталей из алюминиевых сплавов, обеспечивающих получение бездефектных сварных швов, взят диапазон параметров: скорость вращения инструмента $\omega=350-1000\text{мин}^{-1}$, скорость перемещения инструмента $V_{\text{св.}}=1,68-9,6\text{м/ч}$, угол наклона инструмента $\alpha=1,5-2,5^\circ$;
- для биметаллической системы охлаждения: $\omega=710-1000\text{мин}^{-1}$, $V_{\text{св.}}=3,36-6,72\text{м/ч}$, $\alpha=2-3^\circ$.

По результатам испытаний на соответствие ТУ деталей из алюминиевого сплава утверждено применение данной технологии для изготовления корпусных деталей в серийном производстве. По результатам изготовления образцов-имитаторов комбинированной системы охлаждения принято решение и произведен запуск в производство партии опытных радиаторов для проведения испытаний на соответствие ТУ и дальнейшего применения данной технологии в аналогичных изделиях.

Таким образом, технология СТП позволяет обеспечить получение бездефектных швов при изготовлении корпусных деталей из алюминиевых сплавов, а также является единственной технологией, позволившей получить равнопрочное соединение алюминиевых сплавов с медью при изготовлении биметаллической комбинированной системы охлаждения.

Список литературы

1. Люшинский А.В. Современные технологии сварки. Инженерно-физические основы. М.: ИД «Интеллект», 2013. – 240с.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1420

А.Г. МАЛИКОВ¹, А.М. ОРИШИЧ¹, Е.В. КАРПОВ^{1,2}

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: smalik@ngs.ru

Алюминиево-литиевые сплавы обладают малой плотностью, повышенным модулем упругости и высокой прочностью по сравнению с обычными алюминиевыми сплавами и являются перспективными материалами для авиакосмической промышленности. В последнее время возникает повышенный интерес к среднепрочным алюминиево-литиевым сплавам системы Al-Mg-Li, которые являются коррозионностойкими трещиностойкими, имеют чрезвычайно низкую плотность и обладают способностью надежно свариваться [1].

В данной работе, в продолжение исследований [2, 3], проведена серия экспериментальных работ по оптимизации процесса термической постобработки (закалка и искусственное старение) лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1424 системы Al-Mg-Li по температурным и временным характеристикам с целью получения значений предела прочности, предела текучести и предельного относительного удлинения, близких к соответствующим характеристикам основного сплава или равных им.

Проведены малоцикловые испытания термообработанных сварных соединений на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки, при температурах -60, +20, +85 °С. Исследована структура поверхностей разрушения сварных швов с термообработкой и без нее после растяжения при различных амплитудах нагрузки, при повышенных и пониженных температурах.

В результате для образцов сварных соединений алюминиево-литиевого сплава 1420 системы Al-Mg-Li установлены закономерности изменения предела прочности, предела текучести и относительного удлинения от температурных и временных характеристик процесса термообработки в виде закалки и искусственного старения. Закономерности поведения кривых показывают наличие ярко выраженных максимумов и минимумов в зависимости от температурных и временных характеристик процесса термообработки.

Для сварных соединений сплава 1420 системы Al-Mg-Li режимы достижения механических характеристик (предела прочности, предела текучести), превышающие соответствующие характеристики основного сплава или равные им составили: закалка при температуре 490 °С с выдержкой 30 мин с последующим искусственным старением при температуре 170 °С с выдержкой 16 часов. Установлено изменение структурно-фазового состава образцов со сварным соединением. При оптимальных режимах термообработки в твердом растворе сварного шва для сплава 1420 системы Al-Mg-Li формируется упрочняющая фаза $\delta'(Al_3Li)$. Тем самым управляя параметрами термической обработки образцов со сварным соединением, возможно, целенаправленно влиять на формирование заданных механических свойства сварного шва за счет изменения структурно-фазового состава сварного шва.

Впервые для образцов со сварным соединением сплава 1420 системы Al-Mg-Li построены 3D-карты механических свойств (предела прочности, предела текучести, предельного относительного удлинения) в зависимости от температуры и времени старения.

Сравнение изломов сварных соединений без термообработки и с термообработкой показало, что при температуре испытаний $T=85$ °С на поверхности излома после усталостного растяжения присутствуют террасы, прилегающие к газовым порам. При температуре испытаний $T=20$ и -60 °С с необработанным швом отсутствует разрыв по границе шва и ЗТВ, характерный для термообработанного шва, где он наблюдается на значительной части поверхности излома, при необработанном шве разрушение всегда проходило внутри шва.

В результате сравнения циклического нагружения сварных соединений без термообработки и с термообработкой установлено, что при $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ для термообработанного сварного шва резко снижается усталостная долговечность по сравнению с не термообработанным. У обработанного и у необработанного шва при $T=-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ не отмечается отрицательного влияния низкой температуры на усталостную долговечность. При температуре испытаний $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ предельное число циклов для необработанного шва составило 14000, а для обработанного шва при той же начальной деформации и температуре испытаний предельное число циклов равно 22000.

На основе полученных результатов можно предположить, что высокопрочные сварные соединения из сплава 1420 системы Al-Mg-Li, можно применять в ответственных сварных изделиях, работающих в интервале температур $20; -60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Список литературы

1. Abd El-Aty A, Xu Y, Guo X, Zhang SH, Ma Y, Chen D. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review. // J. Adv. Res. 2018 V.10 P.49–67. doi:10.1016/j.jare.2017.12.004.
2. Оришич А. М., Маликов А. Г., Карпов Е. В. и др. Исследование влияния закалки на прочностные свойства сварных соединений алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Li, выполненных методом лазерной сварки // Международная конференция "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций"; X Международная конференция "Химия нефти и газа": тезисы докладов. Томск. 2018. – С. 524-525. DOI: 10.17223/9785946217408/338.
3. Маликов А.Г., Оришич А.М., Карпов Е.В. Малоцикловые испытания лазерных сварных соединений алюминий-литиевых на пульсирующее растяжение при повышенных и пониженных температурах // Международная конференция "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций"; X Международная конференция "Химия нефти и газа": тезисы докладов. Томск. 2018. – С. 517. DOI: 10.17223/9785946217408/332.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект №17-79-20139.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ Ti-Al-Cr, ПОЛУЧЕННЫХ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКОЙ

О.Э. МАТЦ, Д.В. ЛАЗУРЕНКО, Р.И. КУЗЬМИН, М.В. РАШКОВЕЦ, Л.В. ЧУЧКОВА

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: o.matts@mail.ru

В настоящее время значительное внимание уделяется материалам на основе алюминидов титана, в связи с тем, что они обладают такими свойствами, как низкая плотность, высокая жаростойкость и относительно низкая стоимость. Такие материалы являются многообещающими для высокотемпературных применений. В научной литературе часто обсуждаются одно- и двухфазные материалы, представленные интерметаллидными соединениями Ti_3Al и $TiAl$. В то же время, триалюминид титана ($TiAl_3$) имеет ряд преимуществ по сравнению со свойствами других алюминидов титана, среди которых повышенный уровень жаростойкости и относительно низкая плотность ($3,3 \text{ г/см}^3$). Тем не менее, указанный интерметаллид недостаточно подробно изучен, что обусловлено его низким уровнем трещиностойкости при комнатных температурах.

С целью повышения трещиностойкости триалюминида титана предлагается легировать его хромом, что позволит изменить тетрагональную низкосимметричную решетку $TiAl_3$ на более симметричную – кубическую, систем плоскостей скольжения которой будет достаточно для пластической деформации материала. Отмечается, что некоторый уровень пластичности поликристаллического материала достигается при легировании триалюминида титана 7-13 ат.% Cr, при этом атомы хрома замещают атомы алюминия.

В литературе интерметаллидные покрытия, состоящие преимущественно из триалюминида титана, обсуждаются крайне редко. Поэтому цель данной работы заключается в формировании жаростойких покрытий на основе Ti-Al-Cr на поверхности титановых сплавов методом вневакуумной электронно-лучевой обработки, а также оценке структурных превращений, химического состава и механических свойств. Предложенный подход позволит значительно расширить область применения титановых сплавов.

Для получения покрытий используется электронный ускоритель ЭЛВ-6. Экспериментальная часть работы проводится в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск. В качестве исходных материалов выбраны основы из титанового сплава ВТ1-0, наплавочные смеси состояли из порошков титана, алюминия, хрома и флюсов.

По результатам проведенного исследования установлено, что обработка наплавочной смеси электронным лучом позволила сформировать качественные покрытия с высоким уровнем адгезии к материалу основы. Микротвердость наплавленных слоев составила $550 \text{ HV}_{0,1}$, а уровень микротвердости титанового сплава – $120 \text{ HV}_{0,1}$. Обнаружено, что при индентировании материала с нагрузкой на индентор 50 Н трещины в наплавленных слоях не появляются. Таким образом, технология вневакуумной электронно-лучевой обработки позволяет модифицировать поверхности титановых сплавов путем наплавления различных порошков.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Н.А. МАХУТОВ¹, И.В. МАКАРЕНКО¹, Л.В. МАКАРЕНКО

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва
E-mail: I.V.Makarenko@yandex.ru

В объеме решения фундаментальных задач обеспечения и повышения прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности сварных элементов высоко ответственного оборудования предложены уточняющие расчетно-экспериментальные методы диагностики, моделирования повреждений, дефектности и разнонаправленности нелинейных процессов разрушений.

Так как одной из актуальных проблем является технология изготовления сварных соединений конструктивных элементов с неоднородными физико-механическими свойствами, то особую важность приобретает разработка теоретических подходов моделирования их ресурсоспособности.

На основе анализа исследования современных моделей расчетно-экспериментальных результатов и численных методов программных алгоритмов расчета прочности и живучести оборудования проведено моделирование разнонаправленной кинетики упругопластического разрушения в сварных соединениях конструкционных сталей с учетом криогенных температур.

При расчете на сопротивление разрушению элементов конструкций с учетом исходных разно-ориентированных дефектов типа полуэллиптических трещин, необходимо учитывать одновременное взаимодействие условия охлаждения и нагрева, процесс упругопластического деформирования, поля остаточных напряжений и деформаций сварки и их кинетику в процессе нагружения, неоднородность физико-механических свойств материала и их зависимость от температуры.

Так как на напряженно-деформированное состояние (НДС) металла сформировавшегося в процессе сварки с учетом его анизотропии, накладываются эксплуатационные циклы упругопластического деформирования, то создаются характерные особенности кинетики перераспределения остаточных сварочных напряжений и деформаций в целом. Прогнозирование развития таких очаговых дефектов как наклонных поверхностных полуэллиптических трещин при этом, позволяет однозначно квалифицировать опасность разрушения сварных соединений.

В работе представлена уточняющая методология расчета допускаемых критических размеров исходных и эксплуатационных полуэллиптических наклонных поверхностных трещин на основе выше указанных факторов с нелинейными краевыми условиями нагружения.

Даны функциональные зависимости критических коэффициентов интенсивности деформаций от криогенных температур для исследуемых сталей.

На основе построенной математической модели распределения механических свойств по объему сварного соединения на примере аустенитных нержавеющей сталей сформулированы уточняющие характеристики уравнений состояния нелинейной механики разрушения.

Проведены исследования полного цикла разнонаправленного упругопластического разрушения на основе уточненных параметров нелинейной механики разрушения.

На основе деформационного критерия разрушения сформулированы основные положения и общая методология проведения уточняющего расчета прочности и живучести сварных элементов ответственного оборудования, а также предложена расчетная модель определения эквивалентного коэффициента интенсивности деформаций по фронту постулируемых трещин при неупругом деформировании.

МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.А. МАХУТОВ, И.Н. ОДИНЦЕВ, В.В. ИНОЗЕМЦЕВ, Т.П. ПЛУГАТАРЬ, А.Б. СЧАСТЛИВЦЕВ

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва

E-mail: ino54@mail.ru

Известно, что одним из важнейших факторов, определяющих фактические прочностные характеристики сварных соединений, является наличие в их зоне значительных остаточных напряжений (ОН). Несмотря на появившуюся с развитием компьютерных технологий принципиальную возможность получения расчетных оценок полей ОН путем численного физико-механического моделирования сварочных процессов, все же основным источником достоверной информации о напряженном состоянии материала остается экспериментальный анализ. С этой целью на протяжении многих лет разрабатывались и использовались различные принципы измерений. При этом главенствующую роль играют подходы, базирующиеся на регистрации и последующей механо-математической интерпретации деформационных откликов объектов на то или иное пробное деструктивное воздействие [1]. Очевидно, что в общем случае данный принцип применим лишь к исследованию закономерностей формирования ОН на специальных разрушаемых образцах, изготовленных в соответствии с конкретными технологиями. Вместе с тем, широко используемый на практике метод зондирующих отверстий зачастую позиционируется как «полуразрушающий», так как негативные последствия от сверления малоразмерных отверстий в крупногабаритных конструкциях оказываются не столь существенными (тем более, если по окончании испытаний выполняются те или иные восстановительные операции: заварка, заклепка и т.п.).

Общая процедура определения ОН методом сверления отверстий-индикаторов (как и другими разрушающими методами) включает в себя два самостоятельных этапа. Во-первых, производится регистрация параметров деформационного отклика объекта (в той или иной его форме), вызванного обнулением соответствующих компонент полного тензора напряжений на образующейся свободной поверхности. Во-вторых, осуществляется решение, по существу, обратной задачи механики с определением компонент тензора ОН, удовлетворяющих зарегистрированным в эксперименте деформационным характеристикам в рамках принимаемой априори механической модели.

Реализация первого этапа в текущей инженерной практике традиционно основывается на применении «точечных» тензометрических методов. (Это нашло отражение, в частности, в ряде национальных отраслевых стандартов.) Вместе с тем, развитие методологии экспериментальной механики предоставило во многих отношениях более совершенный инструмент, базирующийся на бесконтактном высокоточном интерференционно-оптическом измерении полей перемещений на поверхности деформируемого тела. Наиболее оптимальным для решения рассматриваемой задачи является метод электронной цифровой спекл-интерферометрии [2]. С его помощью визуализируются поля отдельных компонент полного вектора перемещений в виде картин так называемых полос корреляции. (Соответствующие интерферограммы наблюдаются на цифровых – компьютерных – изображениях деформируемого тела.) Цена полосы здесь составляет десятые доли от длины волны видимого излучения лазера, применяемого для освещения объекта. Заметим, что для последующей интерпретации экспериментальной информации в терминах ОН оптимальным является регистрация двух взаимно ортогональных компонент тангенциальных перемещений, что обеспечивается применением известных схем частных спекл-интерферометров, рисунок 1.

Испытания малогабаритных объектов осуществляются в лабораторных условиях на виброзащищенных оптических стендах. Как правило, такие эксперименты связаны с поисковыми исследованиями, выполняемыми на специально подготовленных образцах со сварными соединениями. Вместе с тем, большой практический интерес вызывает определение уровней и пространственных распределений ОН в реальных (крупных)

конструкциях в полевых (эксплуатационных) условиях. С этой целью в ИМАШ РАН в сотрудничестве с НПС «РИСКОМ» разработан автономный спекл-интерферометр, обеспечивающий проведение работ подобного рода, рисунок 2. Его особенностями являются: во-первых, применение компактных специальных комплектующих (лазера, цифровой видеокамеры); во-вторых, оптимизация, собственно, измерительной оптической схемы; в-третьих, высокая конструктивная жесткость механической компоновки всех составляющих.

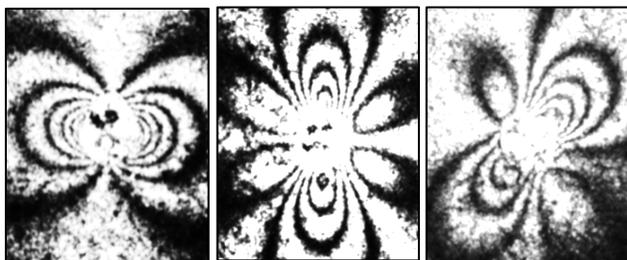


Рисунок 1 - Типичные интерферограммы полей тангенциальных перемещений, зарегистрированные в зоне засверловки отверстий-индикаторов

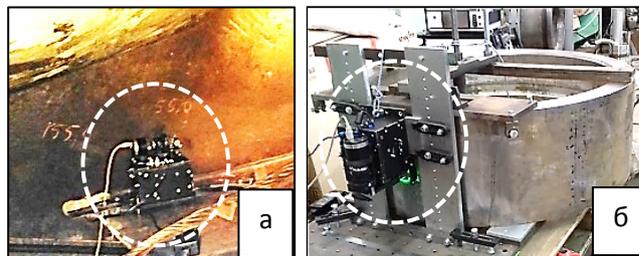


Рисунок 2 - Интерферометр, установленный на лопасти рабочего колеса гидротурбины Красноярской ГЭС (а), на катушке-образце трубопровода Ду-850 со сварным швом (б)

Второй этап работы, то есть, расчет компонент ОН в точках засверловки, заключается в минимизации невязки между экспериментально регистрируемым деформационным откликом $R_{\text{эксп}}(\vec{r})$ и его теоретически ожидаемым представлением $R_{\text{теор}}(\vec{r}, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ за счет варьирования в последнем неизвестных параметров напряженного состояния (то есть, $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$). Значения компонент тензора напряжений, при которых требуемый минимум достигается, принимаются в качестве искоемых величин. В качестве конкретной формы отклика $R_{\text{эксп}}$ в данном случае выступают компоненты тангенциальных перемещений, измеренные в представительном множестве точек на полученных интерферограммах. Форма теоретически ожидаемого отклика $R_{\text{теор}}$ определяется решением (аналитическим или численным) соответствующей прямой задачи механики деформируемого твердого тела.

В целом проведение испытаний поддерживается разработанным единым программным комплексом, обеспечивающим как визуализацию и первичную обработку (в интерактивном режиме) электронных интерферограмм (на первом этапе), так и их указанную выше расширенную математическую интерпретацию (на втором этапе).

В заключение заметим, что в последнее время активно развивается иной подход к экспериментальному определению ОН в материале, основанный на неразрушающем (в явном виде) пробном воздействии на объект – упругопластическом вдавливании жесткого индентора заданной формы. Расчет значений ОН в точках воздействия здесь также связан с решением обратной задачи, но более трудоемкой и в большей мере некорректной. Адекватность итоговых результатов во многом определяется объемом и точностью исходной информации о возникающем деформационном отклике тела. Метод спекл-интерферометрии, реализованный, в частности, в разработанном оборудовании, является наиболее эффективным инструментом для ее получения.

Список литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 233 с.
2. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Развитие методов расчетного и экспериментального определения локальных остаточных напряжений при сложных спектрах нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин – 2015. – № 6. – С. 53-62.

Работа выполнена при поддержке гранте РФФИ № 18-08-00572.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.В. МЕДВЕДЕВ

Объединенный институт проблем информатики НАНБ, г. Минск, Беларусь

Email: medv@newman.bas-net.by

Цель доклада – придать известным принципам конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций Н.О. Окерблома новые качества в условиях масштабного использования современных информационных и суперкомпьютерных технологий.

Информационные связи между сварной конструкцией, средствами технологического оснащения и сварочными инструментами обеспечиваются за счет единых трехмерных твердотельных моделей. Оперативный прогноз напряженно-деформированных состояний (НДС) сварных конструкций с учетом порядка и направлений нанесения сварных швов основан на предложенном автором упрощенном силовом подходе, “погруженном” в среду универсальных систем конечно-элементного анализа, развернутых на доступных суперкомпьютерных ресурсах и/или грид-сетях.

Основные научные и практические результаты – созданы и апробированы в производственных условиях программно-методические и инфраструктурные средства оперативного анализа и прогнозирования напряженно-деформированных состояний сварных конструкций, изготавливаемых дуговыми способами сварки из сталей обычного качества и низколегированных; НДС может оперативно изменяться с учетом результатов автоматизированного конструирования технологически необходимых средств технологического оснащения; процессы разрушения сварных конструкций с учетом их внутреннего НДС и внешних переменных нагрузок прогнозируются и отображаются в высокопроизводительной среде российско-белорусских суперкомпьютеров семейства СКИФ.

Систематическое использование суперкомпьютерных технологий и соответствующих инфраструктур подготовленными специалистами-сварщиками нового поколения в состоянии обеспечить постановку на производство конкурентоспособной продукции за приемлемые сроки с учетом влияния конструктивно-технологических решений.

Доклад иллюстрируется практическими примерами из деятельности белорусских предприятий и организаций. Рассматриваемые программно-методические средства конструктивно-технологического проектирования и суперкомпьютерного моделирования сварных конструкций могут быть доступны заинтересованным структурам, организациям и специалистам с любого рабочего места, где имеется гарантированный доступ в сеть Интернет.

Выводы и рекомендации.

1. Суперкомпьютерные технологии прогнозного моделирования и конструктивно-технологического проектирования ответственных сварных конструкций разработаны, апробированы и эффективно используются разработчиками в интересах белорусских предприятий, а также в учебном процессе профильных сварочных кафедр.

2. Не имеется принципиальных затруднений для переноса имеющегося научно-методического и программного задела на другие предметные сборочно-сварочные области, типы сварных конструкций и технологий.

3. Одно из приоритетных направлений развития и совершенствования предложенных подходов – построение полностью лицензионно независимой моделирующей среды, развернутой на технических средствах офисных суперкомпьютерах семейства СКИФ.

Список литературы

1. Okerblom N.O. Structural and technological design of welded structures. –М. – L.: Mechanical engineering, 1964. – p. 420.
2. Medvedev S.V. Computer modeling of residual welding strains in technological design of welded structures // Welding International. – 2002. – vol. 16 (1). – P.59-65.

3. Klimau K., Medvedev S. Prognosis supercomputer modeling of welded structures behavior under dynamics loads // The 20th Scientific Slovak-Polish conference «Machine modeling and simulations 2015» September 7 - 9, Terchov, Slovak Republic, Trencin Alexander Dubcek University; Puchov: Faculty of Industrial technologies, 2015. – P.21-27.
4. Medvedev S.V. Computer technologies of design of assembly and welding equipment – Minsk: Institute of Technical Cybernetics NAN Belarus, 2000. – 194 p.
5. Medvedev S.V, Klimov K.A. Forecast supercomputer modeling of the behavior of welded structures under dynamic loads // Izvestiya TulGU. Technical science. Issue. 6 in 2 parts. Tula: Publishing House of Tula State University, 2015. – P.201-210.
6. Medvedev, Sergey Computer and supercomputer technologies for the design and technological design of welded structures / Sergey Medvedev, K.A. Klimov // The 4th IWE South – East European Welding Congress “Safe Welded Construction by High Quality Welding“ (10 - 13 October 2018), Belgrade, Serbia. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://seeiiw2018.duzs.org.rs>.

ВЛИЯНИЕ АЗОТА НА СТРУКТУРУ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Р.А. МЕЙСТЕР, А.М. ТОКМИН, В.А. ПАДАР

Политехнический институт, СФУ, г. Красноярск

E-mail: evangelist7@gmail.com

Сталь 12X18H9T толщиной 1 мм сваривалась встык проволокой ER308LSi диаметром 0,8 мм сверху вниз на прямой полярности в азоте высокой чистоты. Дуга питалась от однофазного выпрямителя с конденсаторным множителем напряжения током 27 А и напряжением дуги 22 В. Формировались швы с потерями на угар и разбрызгивание 2-4 %.

Микроструктура сварного соединения представляет четыре явно выраженные области. Первая зона, удаленная от сварного шва на расстояние около 2 мм, имеет строение, характерное для холоднокатанной стали. Можно отчетливо наблюдать, характерные для этого вида деформации, вытянутые вдоль направления прокатки зерна аустенита. Размеры зерна в продольном направлении во много раз превышают поперечные. Это свидетельствует о значительной пластической деформации на последней стадии холодной прокатки листа.

Вторая зона имеет строение, характерное для зоны термического влияния. Степень ориентации зерен изменяется, и наблюдаются участки с рекристаллизованной структурой. Следует отметить, что процесс рекристаллизации произошел частично, это, по-видимому, связано с малой продолжительностью нагрева этой зоны до температур близких к температуре солидус при которых происходит быстрая рекристаллизация. Наряду с рекристаллизованными зернами наблюдаются области с сохранившейся исходной полосчатой структурой. По мере удаления от зоны сплавления размеры рекристаллизованных зерен существенно уменьшаются, что указывает на уменьшение процессов вторичной рекристаллизации.

Третья зона имеет строение, характерное для быстрозакристаллизованной стали. Наблюдаются дендриты, имеющие вытянутое строение. Первичные оси дендритов имеют наибольшую протяженность в направлении противоположном максимальному теплоотводу.

Четвертая зона, которая находится в центральной части сварного шва, имеет равновесную дендритную структуру (рис 1).

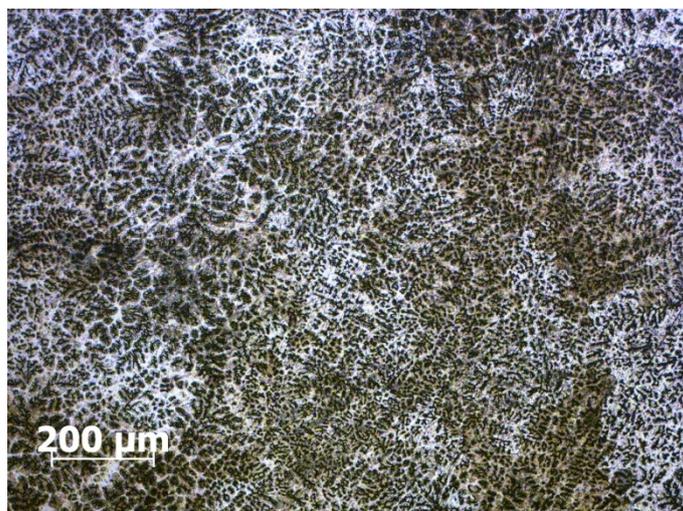


Рисунок 1 – Структура центральной зоны сварного шва с равноосными дендритами

Данные спектров с различных участков указывают практически на идентичный химический состав стальной пластины, из которой изготовлены образцы для сварки и самого сварного шва.

Для более детального исследования сварного шва были выполнены электронномикроскопические исследования при больших увеличениях (рис. 2).

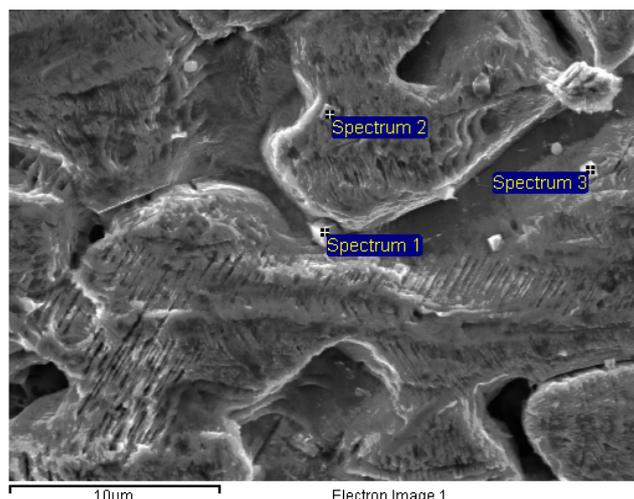


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение сварного шва со спектрами дисперсных частиц, x4000

Элементный состав дисперсных частиц (табл. 1) указывает на высокое содержание в них титана и азота, что соответствует нитридным частицам.

Таблица 1 – Элементный состав спектров в вес , x4000

All results in weight%								
Spectrum	N	O	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Total
Spectrum 1	24.34			54.83	7.75	11.77	1.31	100.00
Spectrum 2	18.90			52.76	9.19	17.25	1.90	100.00
Spectrum 3	12.10	8.78	1.67	46.31	8.55	20.43	2.15	100.00

Измерения проводились с шагом 100 мкм. При переходе зоны сплавления наблюдается некоторое повышение твердости сварного шва, т.е. объема металла, который какое-то время находился в жидком состоянии (рис. 3).

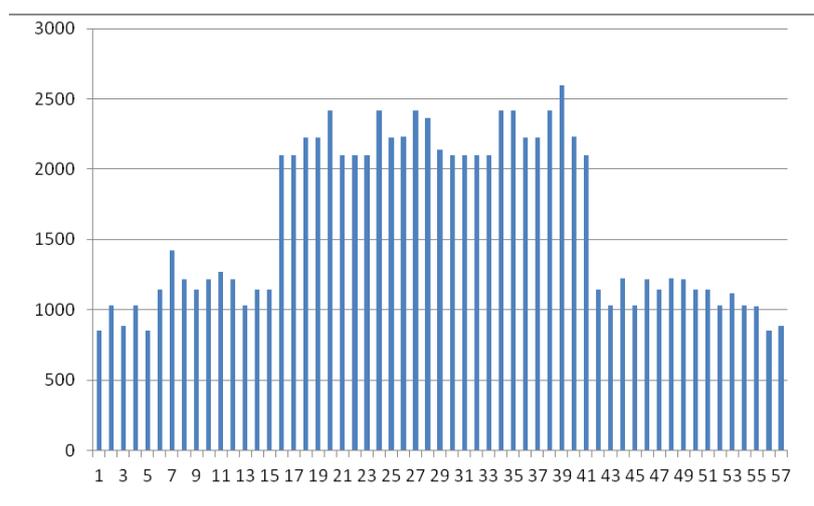


Рисунок 3 – Микротвердость сварного соединения

По-видимому, под действием электрической дуги произошла диссоциация и ионизация азота, что привело к его взаимодействию с расплавленным металлом с образованием дисперсных нитридов титана.

При испытании образцов на статическое растяжение разрушение происходит по основному металлу.

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАСОЧНОЙ ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Д.М. МЕЛЬНИКОВ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: daenoor@gmail.com

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) активно внедряются в производство во всех развитых странах. Но в то же время у АТ существует ряд особенностей, которые препятствуют более широкому их применению, особенно в отечественной промышленности. Поэтому целью этой работы является разработка технологии СЛП с применением двухлучевой обработки и масочной технологии для повышения эффективности и производительности процесса СЛП по сравнению с его существующим уровнем развития, что способствует интеграции этого процесса в современное производство.

В настоящее время одной из проблем СЛП является его низкий КПД, который составляет приблизительно 10 % ввиду неэффективности взаимодействия лазерного излучения с материалом. К тому же у СЛП крайне низкая производительность: она ограничена скоростью нанесения порошка, а также скоростью сканирования лазерным лучом зоны обработки. Скорость сканирования лазерного луча по слою при его плавлении, в свою очередь, ограничена ввиду возможности образования дефектов. Также в детали, выращенной СЛП, наблюдаются высокие остаточные напряжения, что повышает риск разрушения детали.

В существующих установках СЛП эти проблемы решаются, в основном, двумя способами. Известен способ подогрева подложки, на которой выращивается деталь. Это позволяет снизить напряжения в детали и повысить КПД до 20 %. Или же применяют сразу несколько лазерных источников или лучей, которые параллельно обрабатывают отдельные участки слоя одной детали или слои различных деталей. Но подобные установки становятся крайне сложными уже при четырех применяемых лазерных лучах. К тому же в обоих упомянутых случаях улучшение технологии идет за счет наращивания мощностей, что энергетически неэффективно.

С целью устранения этих проблем предлагается технология, заключающаяся в следующем. На слой порошка последовательно действуют два лазерных импульса: сначала длинный импульс диодного лазера (порядка сотен микросекунд), а затем наносекундный импульс Nd:YAG лазера. Причем на обрабатываемый слой лазерные лучи попадают уже с заданным маской профилем в их поперечном сечении, который соответствует форме слоя выращиваемой детали. В данном процессе первый лазерный луч разогревает порошок, а второй луч его спекает.

В разрабатываемой технологии увеличение производительности достигается путем применения масочной технологии. Предлагается, чтобы лазерный луч, пройдя через специальную оптическую систему с маской, обрабатывал весь формируемый слой детали за один раз. Таким образом, скорость процесса СЛП будет ограничиваться только скоростью нанесения порошка. К тому же за счет синергетического эффекта двух лазерных лучей будет наблюдаться повышение КПД процесса. Так импульс Nd:YAG лазера действует на уже подогретый лучом диодного лазера порошок, поэтому более эффективно им поглощается и сплавляет слой.

ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА НА ОСНОВЕ ПЫЛИ ГАЗООЧИСТКИ СИЛИКОМАРГАНЦА

А.Р. МИХНО, Н.А. КОЗЫРЕВ, Р.Е. КРЮКОВ, А.А. УСОЛЬЦЕВ, М.В. ПОПОВА

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

В электрометаллургии стали используются технология прямого восстановления марганца из оксидного сырья, минуя процесс получения восстановленного марганца

Такой процесс, протекающий при дуговом разряде, может быть реализован в процессе наплавки порошковыми проволоками [1-5], в которой в качестве наполнителя используют восстанавливаемое оксидное вещество и восстановитель. Возможность изготовления порошковых проволок на основе пыли газоочистки алюминиевого производства (в качестве восстановителя) и пыли газоочистки силикомарганца (в качестве восстанавливаемого компонента - оксида марганца) рассмотрена в рамках научно-исследовательской работы.

Изготовление проволоки проводили на лабораторной установке по изготовлению порошковых проволок по технологии с пропусканием через фильеры. Диаметр изготовленной проволоки 6 мм, оболочка выполнена из ленты Ст3. В качестве наполнителя использовались: пыль газоочистки алюминиевого производства мас. %: $Al_2O_3 = 21-46,23$; F = 18-27; $Na_2O = 8-15$; $K_2O = 0,4-6$; $CaO = 0,7-2,3$; $Si_2O = 0,5-2,48$; $Fe_2O_3 = 2,1-3,27$; $C_{общ} = 12,5-30,2$; $MnO = 0,07-0,9$; $MgO = 0,06-0,9$; S = 0,09-0,19; P = 0,1-0,18 и пыль газоочистки силикомарганца, мас. %: $Al_2O_3 = 2,43$; $Na_2O = 1,32$; $K_2O = 5,56$; $CaO = 6,4$; $SiO_2 = 29,19$; $BaO = 0,137$; $MgO = 7,54$; S = 0,23; P = 0,04; Fe = 1,067; Mn = 27,69; Zn = 2,687; Pb = 3,833.

После изготовления порошковых проволок проводилась наплавка образцов на сталь 09Г2С под слоем флюса изготовленного из шлака производства силикомарганца. Дальнейшим этапом исследования было изучение химического состава наплавленных образцов, проведение микроструктурного анализа, а также исследования по изучению твердости и износостойкости образцов.

Результатами полученных исследований стало изучение принципов прямого легирования с помощью пыли газоочистки производства силикомарганца и пыли газоочистки алюминиевого производства. Были определены оптимальные технологические режимы наплавки, изучены качественные показатели и рассчитано усвоение марганца при различных соотношениях компонентов.

Список литературы

1. Козырев Н.А. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков/ Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев, А.А. Уманский, П.Д. Соколов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018.– Вып. 1 (1417). – С. 77-86.
2. Уманский А.А. Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки для наплавки прокатных валков, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик наплавленного металла/ Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А.// Производство проката. – 2016. – № 5. – С. 43-47.
3. Уманский А.А. Экспериментальные исследования влияния состава порошковых проволок систем легирования С-Si-Mn-Cr-V-Mo и С-Si-Mn-Cr-W-V/ Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А.// Бюллетень «Черная металлургия» -2016. – № 4. – С. 74-78.
4. Козырев Н.А. Изучение влияния введения в шихту для производства порошковой проволоки системы С-Si-Mn-Cr-W- V углеродфторсодержащей добавки и никеля / Козырев Н.А., Титов Д.А., Старовацкая С.Н., Шурупов В.М., Горюшкин В.Ф.// Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2014. – № 6. – С. 31-33.
5. Козырев Н.А. Влияние введения в шихту для производства порошковой проволоки системы С-Si-Mn-Cr-V-Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля / Козырев Н.А., Титов Д.А., Старовацкая С.Н., Козырева О.Е., Шурупов В.М. // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2014. – № 4. – С. 34-37.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Р. МИХНО, Р.Е. КРЮКОВ, Н.А. КОЗЫРЕВ, А.А. УСОЛЬЦЕВ, О.А. КОЗЫРЕВА

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Одним из перспективных направлений в сварочном производстве является разработка новых сварочных флюсов для сварки наплавки с использованием техногенных отходов металлургического производства [1-2].

В рамках научно-исследовательской работы были проведены исследования различных флюсов и флюс – добавок на основе техногенных отходов металлургического производства [3-5], содержащие:

- Ковшевой шлак электросталеплавильного производства рельсовой стали АО «ЕВРАЗ ЗСМК», мас. %: 1,31% FeO, 0,22% MnO, 36,19% CaO, 36,26% SiO₂, 6,17% Al₂O₃, 11,30% MgO, 0,28% K₂O, 3,34% F, <0,12% C, 1,26% S, 0,02% P.

- Шлак силикомарганца производства Западно - Сибирского электрометаллургического завода, мас. %: Al₂O₃ 6,91-9,62%, CaO 22,85-31,70 %, SiO₂ 46,46-48,16 %, FeO 0,27-0,81 %, MgO 6,48-7,92 %, MnO 8,01-8,43%, F 0,28-0,76%, Na₂O 0,26-0,36% K₂O до 0,6 2 %, S 0,15-0,17 %, P 0,01 %.

- Пыль электрофильтров алюминиевого производства ОК «РУСАЛ», мас. %: Al₂O₃ = 21–46,23; F = 18–27; Na₂O = 8–15; K₂O = 0,4–6; CaO = 0,7–2,3; SiO₂ = 0,5–2,48; Fe₂O₃ = 2,1–3,27; C_{общ} = 12,5–30,2; MnO = 0,07–0,9; MgO = 0,06–0,9; S = 0,09–0,19; P = 0,1–0,18.

Полученные результаты научно-исследовательской работы указывают на возможность использования отходов металлургического производства в качестве сварочных и наплавочных флюсов.

Использование ковшевого электросталеплавильного шлака в качестве основного флюса в смеси с флюс – добавками на основе: шлака производства силикомарганца, пыли газоочистки алюминия. Позволяют снизить загрязненность сварного шва и наплавленного валика неметаллическими включениями, повысить твердость и износостойкость наплавленных образцов, снизить содержание кислорода в сварных швах, а также повысить ударную вязкость KCV при положительных и отрицательных температурах.

Список литературы

1. Айматов, В.Г. Исследование влияния добавки барий-стронциевого модификатора на свойства сварочного флюса на основе шлака силикомарганца / В.Г. Айматов, А.Р. Михно; науч. рук. Н.А. Козырев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 13-15 июня 2018 г. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2018. – Вып. 22. – Ч. 2: Естественные и технические науки.– С. 202-205. – Библиогр.: с. 204.
2. Михно А.Р. Использование белого ковшевого электросталеплавильного шлака и шлака производства силикомарганца при изготовлении сварочных флюсов / А.Р. Михно, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР; ФЕРРОСПЛАВЫ: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых. – Екатеринбург, 2018. – С. 322-325. – Библиогр.: с. 325
3. Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев, А.Р. Михно, Л.П. Башенко Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 6 (1422). – С. 55-66. – Библиогр.: с. 63
4. Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.А. Усольцев, А.Р. Михно, Л.В. Думова Исследование и разработка сварочных флюсов с использованием ковшевого электросталеплавильного

- шлака и барий-стронциевого модификатора для наплавки прокатных валков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 4. – С. 274-279. – Библиогр.: с. 278
5. Р.Е. Крюков, Н.А. Козырев, Л.П. Башенко, О.Е. Козырева, А.Р. Михно Использование барий-стронциевого карбоната при изготовлении сварочных флюсов на основе шлака производства силикомарганца // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 8. – С. 596-600. – Библиогр.: с. 599.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЛУЧЕНИЯ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

О.В. МКРТЫЧЕВ

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова Новороссийский филиал, г. Новороссийск
E-mail: oleg214@ya.ru

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования оптической прочности стеклянных композитов, с учетом стохастических свойств пробоя наноразмерных покрытий из диоксида кремния и диоксида титана, а также лазерное абляционное разрушение стеклянных композитов, легированных переходными металлами (золото, медь), под действием однократного мощного импульсного лазерного излучения. Композиты, легированные золотом и медью, были получены с помощью золь-гель синтеза с введением соли металла на этапе образования золя. Покрытия из диоксида кремния и диоксида титана также были получены по золь-гель технологии. Это позволило достигнуть равномерного распределения наночастиц или атомов легирующей добавки в объеме геля. В качестве источника излучения использовался твердотельный лазер на алюмо-иттриевом гранате, легированном ионами неодима (АИГ-Nd³⁺ лазер), который генерировал импульсы лазерного излучения на длине волны 1,064 мкм длительностью 30 нс с энергией до 0,15 Дж и длительностью 300 мкс с энергией до 1,2 Дж. Описана установка, собранная на основе стандартного оборудования, позволяющая измерять оптическую прочность поверхности облучаемой детали по результатам испытаний на небольшой выборке деталей. Авторами предложен алгоритм определения абляционной прочности облучаемого материала по пробойному напряжению материала. Пробойное напряжение предлагается определять из сравнения экспериментальных и моделируемых зависимостей напряжения, температуры и надежности поверхности облучаемого материала. На основе предложенной методики измерения проведены экспериментальные исследования оптической прочности однослойных и многослойных наноразмерных покрытий. Показано, что применение статистического распределения Вейбулла–Гнеденко позволяет прогнозировать время безотказной работы образца. Для этого разработан алгоритм определения надежности наноразмерного покрытия по результатам экспериментов с малочисленной выборкой.

РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.В. МОСКВИЧЕВ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал –
Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
Email: krasn@ict.nsc.ru

Многокритериальные оценки конструкционной прочности, трещиностойкости, надежности, живучести и безопасности сварных крупногабаритных конструкций и технических систем базируются на результатах анализа:

- технологической и эксплуатационной дефектности;
- статистических данных причинно-следственного комплекса отказов, разрушений и параметров нагруженности;
- статистических данных и функциональных зависимостей расчетных характеристик механических свойств и трещиностойкости.

На этой основе получены следующие результаты:

- разработана методология ресурсного проектирования сварных конструкций и выполнены расчетные оценки ресурса и надежности типовых сварных соединений с различными типами дефектов сварки и эксплуатационных трещин;
- даны расчетные оценки норм технологической и эксплуатационной дефектности сварных конструкций и выполнены расчеты допускаемых дефектов сварки для конструкций различного назначения;
- развиты расчетно-экспериментальные методы оценки надежности и ресурса сварных соединений по критериям механики разрушения с учетом структурно-механической неоднородности и остаточных напряжений;
- исследованы причины, механизмы и методы испытаний сталей и сварных конструкций в условиях слоистого растрескивания с определением допускаемых характеристик трещиностойкости для случаев слоисто-хрупкого и слоисто-вязкого разрушения;
- выполнены расчеты показателей риска аварийных ситуаций и разрушений элементов сварных конструкций.

Приложения указанных результатов выполнены для элементов конструкций подъемно-транспортной, экскавационной, горно-транспортной техники, технологического оборудования ТЭС, АЭС, ГЭС, сосудов давления и резервуаров для хранения нефтепродуктов, трубопроводных систем и ферменных конструкций.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЛАКИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Н.А. МУРАШОВ, Д.В. ПОНОМАРЕНКО, А.П. ДЕРКАЧ

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва

E-mail: murashov-96@mail.ru

В настоящее время одним из наиболее приоритетных направлений развития нефтегазового комплекса является производство трубной продукции и строительство трубопроводов для транспортировки нефти и газа, которые эксплуатируются в условиях коррозионно-активных сред. Наличие таких сред представляет потенциальную опасность и резко снижает уровень надежности трубопроводов. Повышение надежности работы трубопроводных систем возможно при применении новых технологических и эффективных методов антикоррозионных мероприятий. В данных условиях эксплуатации целесообразным является применение плакированных труб из двухслойных сталей. При этом наружный слой стенки трубы, несущий все прочностные нагрузки, выполняется из низколегированной стали, а внутренний (плакирующий) слой, обеспечивающий коррозионную стойкость, — из коррозионно-стойкой высоколегированной стали.

Сварные соединения плакированных трубопроводов представляют собой сложную в металлургическом отношении систему, формирующуюся при соединении металлов с разным легированием и принадлежащих к различным структурным классам. Участки соединения как основного, так и плакирующего слоев можно отнести к категории соединений однородных металлов. Переходные участки, где соединяются слои с резко отличающимися уровнями легирования, структурой и свойствами, относятся к категории соединений разнородных металлов. Сварку таких трубопроводов ведут с использованием сочетания сварочных материалов, предназначенных для сварки каждого слоя в отдельности и обеспечивающих необходимые механические характеристики основного слоя и коррозионную стойкость корневого плакирующего слоя шва. Но даже в этом случае на границах сплавления разнородных сталей могут образовываться закалочные структуры, вызывая образование трещин сразу после сварки или в период эксплуатации трубопроводов и требуя дополнительных затрат по ремонту данных сварных соединений.

Поэтому целью данной работы явилось исследование влияния наиболее применимых способов сварки магистральных трубопроводов, таких как ручная дуговая, механизированная аргодуговая, механизированная самозащитной порошковой проволокой, автоматическая порошковой проволокой в среде инертных газов на структуру и свойства сварных соединений плакированных труб. На основании анализа нормативных и литературных данных была разработана схема разделки кромок под сварку кольцевых соединений плакированных трубопроводов с целью обеспечения возможности односторонней многослойной сварки и высокой коррозионной стойкости корневого слоя шва.

Определялись температурно-временные параметры термических циклов сварки, анализ которых позволил определить скорости охлаждения металла ОШУ ЗТВ в интервале температур диффузионного распада аустенита. Реализация параметров термических циклов вышеперечисленных способов сварки на плакированных сталях проводилась с использованием имитационного метода. Микроструктуры основного и плакирующего слоев изучали на оптическом микроскопе, а сопротивление хрупкому разрушению определяли с помощью маятникового копра. С помощью электронного сканирующего микроскопа изучали фрактографические характеристики поверхности разрушения.

Полученные данные позволили определить рациональные параметры термических циклов сварки с точки зрения получения благоприятной микроструктуры и прочностных характеристик как для основного, так и для плакирующего слоев шва. Результаты исследования позволяют назначить параметры режимов сварки для выбранных способов с целью дальнейшей разработки технологии сварки и ремонта плакированных трубопроводов.

СООТНОШЕНИЕ ЭНЕРГИЙ СИЛОВОГО И ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКЕ С ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЖЕНИЕМ

С.В. НЕСКОРОМНЫЙ, Е.Л. СТРИЖАКОВ, Д.В. РОГОЗИН

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

E-mail: nescoromniy@mail.ru

Цель. Получение неразъемных соединений из разнородных материалов и разнотолщинных конструкций имеет ряд технологических трудностей в связи с различием теплофизических свойств, химическом взаимодействии, а также градиентом нагрева, приводящий к неравномерному нагреву.

Результаты. При сварке цветных металлов хорошо себя зарекомендовали импульсные способы сварки, позволяющие сформировать сварное соединение в твердой фазе. Основным отличием импульсных способов сварки является носитель энергии и соотношение силового и теплового воздействий.

В ДГТУ предлагается использовать в качестве носителя энергии – электромагнитное воздействие: тепловое за счет протекания импульсного тока, механическое – за счет магнитного давления, создаваемого индукционно-динамическим приводом.

Схема синхронного электромагнитного воздействия реализована в конденсаторной сварке с магнитно-импульсным нагружением путем последовательного соединения свариваемых деталей с индукционно-динамическим приводом. Это позволяет варьировать соотношениями импульсной и тепловой энергии, подаваемой в зону соединения.

Накопленная энергия в батареях конденсаторов обуславливает протекание тока по виткам индуктора и через зону контакта свариваемых деталей, возникающее магнитное давление в рабочей зоне индуктора осуществляет механическое воздействие на зону соединения деталей.

Энергия в батареях конденсаторов расходуется на тепловое и силовое воздействие за счет: изменения индуктивного сопротивления разрядного контура конденсаторной сварки; массы толкателя индукционно-динамического привода; способов предварительной сборки поверхностей (с выступом на торце стержневого элемента, с предварительным контактом или предварительным зазором) свариваемых деталей. В зависимости от соотношений этих энергий, возможно регулировать прочностные показатели полученных сварных соединений.

Экспериментальные исследования по изучению структуры от массы толкателя индукционно-динамического привода проводились на плоских образцах со стержневыми элементами в однородном и разнородном сочетаниях из латуни марки Л63, сплава меди марки М01, алюминиевого сплава АМг3. Емкость накопительного блока варьировали в диапазоне 1800 - 2400 мкФ, частоту разряда тока $f = 2000 - 3000$ Гц., напряжении заряда батарей конденсаторов 2000–3300 В., массу толкателя 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 кг. Качество полученных соединений оценивалось усилием на отрыв.

Проведенные расчеты показали, что для получения неразъемных соединений из разнородных металлов с прочностью не ниже $(0,6-0,8)\sigma_B$ наиболее пластичного сплава,

соотношение энергий должно составлять
$$\frac{W_T}{W_M} = \frac{(60-70)\%}{(40-30)\%} \frac{W_T}{W_M} = \frac{(60-70)\%}{(40-30)\%}.$$

Выводы. Для получения неразъемных соединений из цветных металлов целесообразно использовать способы сварки с возможностью регулирования теплового и механического воздействия на различных этапах процесса.

Конденсаторная сварка с индукционно-динамическим приводом позволяет регулировать соотношение энергий путем изменения индуктивного сопротивления разрядного контура; массы толкателя; способов предварительной сборки поверхностей.

Проведенные исследования по получению сварных соединений из сплавов М01, Л63, АМг3 позволили получить диапазон соотношений с удовлетворительными механическими показателями прочности.

ГИБРИДНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

С.Д. НЕУЛЬБИН, Ю.Д. ЩИЦЫН, И.С. ХОМУТИНИН

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail:sn-1991@mail.ru

Одним из путей в развитии современного машиностроения, направленных на повышение надежности и долговечности выпускаемой продукции, является создание и применение новых энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки материалов и изготовления деталей. В последние годы широкое распространение получили аддитивные технологии, однако их широкое внедрение в производство сдерживается недостаточной изученностью влияния послойного наложения металла, отсутствием технологических рекомендаций получения бездефектной структуры и требуемых механических свойств. Это предопределило необходимость совершенствования процессов наплавки при аддитивном производстве [1].

Получение мелкозернистой структуры наплавленного металла позволяет, как показывает практика, обеспечить высокие механические свойства сварного соединения в частности, а также повысить существенным образом технологическую прочность, коррозионную стойкость и надежность, увеличивая ресурс работы механизма в целом. В этом отношении задача поиска оптимальных условий управления образованием структуры представляет особую важность для развития аддитивных технологий в целом. Наиболее удобным механизмом модификации наплавленного металла представляется воздействие на жидкую ванну в процессе наплавки [2].

Существующие особенности кристаллизации литого металла при сварке и наплавке, позволяют установить, периодичность гармонического характера при затвердевании металла. Одни исследователи склонны считать основной причиной, вызывающей цикличность кристаллизации, выделение скрытой теплоты плавления, тормозящей продвижение фронта затвердевания, другие — концентрационное переохлаждение перед межфазной границей, третьи — периодический подвод тепла к границе. Однако единого мнения пока не сложилось [3].

Анализ литературных источников позволил выявить ряд технологических приемов, позволяющих получить измельченную структуру. Так, хорошо известно использование вибраций сварного изделия; ввод энергии от импульсного источника нагрева; импульсная подача присадочной проволоки в различных пространственных положениях; применение источников с модуляцией сварочного тока, воздействующего на жидкий металл хвостовой части ванны, а также в ряде случаев ввод отдельных тепловых источников, влияющих на зону термического влияния около осевой линии шва; применение внешнего электромагнитного воздействия (ЭМВ) на расплав как в непрерывном режиме, так и пульсирующего с различной частотой магнитного поля и т.д. [4]

Одни авторы связывали условия образования структуры металла шва с влиянием подвода тепла к фронту затвердевания. Другие исследователи полагали, что колебания жидкого металла сварочной ванны играют важную роль в структурообразовании [5].

Анализ применяемых марок сталей показывает, что наиболее часто среди высоколегированных сталей используется сталь марки 12X18H10T. Это объясняется тем, что аустенитные хромоникелевые стали, к которым относится сталь марки 12X18H10T, обладают хорошей свариваемостью, высокой пластичностью и ударной вязкостью, высокими механическими свойствами при отрицательных температурах, устойчивостью против окисления на воздухе и в атмосфере продуктов сгорания топлива при температурах ниже 900 °С, что обеспечивает надежную работу конструкций в течение длительного времени. Однако, при уникальном комплексе физико-механических свойств, исследуемая сталь имеет и ряд недостатков: невысокую прочность и твердость, высокую чувствительность к напряжению при нагрузках и что особенно необходимо отметить, подверженность сварных швов межкристаллитной коррозии (МКК) [6].

В работе предложен метод повышения качества наплавляемых слоев из стали 12X18H10T при аргонодуговой наплавке.

Аргонодуговую наплавку производили на пластины стали 12X18H10T толщиной 3 мм на установке с инверторным источником питания. Аргонодуговую наплавку проводили по режиму, приведенному в табл.2. Волновод подведен снизу пластины.

Таблица 2 – Результаты замеров параметров швов наплавки исследуемых образцов

№ образца	параметры шва наплавки, мм			ширина зоны термовлияния, мм
	ширина шва	усиление	глубина проплавления	
1	5,6	2,1	0,7	3,3
2	6,1	1,5	1,0	2,5

Для исследования возможностей модифицирования структуры применяли дополнительное ультразвуковое воздействие на наплавляемый материал с помощью волновода, подведенного к нижней поверхности пластины. Ранее в работах авторов было установлено, что наибольшее влияние ультразвуковое воздействие оказывает на расстоянии 30 мм от волновода – позиция 3. Для исследования получены 2 образца:

Образец №1 – аргонодуговая наплавка без ультразвукового воздействия.

Образец №2 – аргонодуговая наплавка с ультразвуковым воздействием.

Рассмотрено влияние ультразвуковых колебаний, накладываемых в процессе аргонодуговой наплавки стали 12X18H10T для реализации процесса аддитивного формирования изделий.

Показано, что УЗ колебания оказывают благоприятное воздействие на структурообразование в металле наплавки, а также ЗТВ. Установлено, что достигается уменьшение размера зерна при УЗ воздействии на 2-3 балла.

Отмечается увеличение твердости наплавленного слоя с применением УЗ колебаний до 10% по отношению к режимам обработки без дополнительного воздействия.

Список литературы

1. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. – Киев: Техніка, 1968. – 312 с.
2. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автоматическая сварка. – 1975. – № 5. – С. 7-9.
3. Аристов С.В., Руссо В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Сварочное производство. – 1982. – № 11. – С. 42-44.
4. Петров А. В., Бирман У.И. Кристаллизация металла шва при импульсно-дуговой сварке // Сварочное производство. – 1968. – № 6. – С. 1-3.
5. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Карпов А.Л., Зарипов М.З. Исследование влияния виброобработки в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 09Г2С // Нефтегазовое дело. – 2007. – № 5. – С. 183-186.
6. Алов А.А., Виноградов В.С. Повышение качества металла сварных швов // Сварочное производство. – 1957. – № 7. – С. 9-10.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПЕРВИЧНОЙ МАКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ЭЛС

Т.В. ОЛЬШАНСКАЯ, Е.М. ФЕДОСЕЕВА

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
E-mail: tvo66@mail.ru

Разработана математическая модель для описания процесса кристаллизации и первичной макроструктуры металла шва при ЭЛС. При построении модели был использован аналитический подход, предложенный в работах Прохорова Н.Н. Модель состоит из ряда уравнений: фронта кристаллизации, траекторий осей роста кристаллитов, направляющих углов наклона кристаллитов к координатным плоскостям, скоростей роста кристаллитов по ширине сварного шва, а также уравнения критериев схемы кристаллизации и скорости кристаллизации. Для обеспечения математической постановки задачи придерживаются следующих допущений: 1) форма фронта кристаллизации представляет поверхность, описываемую уравнением изотермы кристаллизации без учета размеров двухфазной жидко-твердой зоны; 2) кристаллиты растут в направлении градиента температуры, соответственно, оси их роста представляют ортогональные траектории к фронту кристаллизации.

Уравнение фронта кристаллизации при ЭЛС (рисунок 1) представляет собой две системы уравнений (отдельно для верхней и нижней части шва), где каждое уравнение описывает изотерму кристаллизации для соответствующей координатной плоскости:

$$\begin{cases} \left(\frac{z}{H_1}\right)^{\omega_1} + \left(\frac{y}{P_1}\right)^{\theta_1} = 1 \\ \left(\frac{y}{P_1}\right)^{\eta_1} + \left(\frac{x}{L_1}\right)^{\nu_1} = 1 \\ \left(\frac{z}{H_1}\right)^{\tau_1} + \left(\frac{x}{L_1}\right)^{\mu_1} = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} \left(\frac{z}{H_2}\right)^{\omega_2} + \left(\frac{y}{P_2}\right)^{\theta_2} = 1 & \text{плоскость } YOZ \\ \left(\frac{y}{P_2}\right)^{\eta_2} + \left(\frac{x}{L_2}\right)^{\nu_2} = 1 & \text{плоскость } XOY \\ \left(\frac{z}{H_2}\right)^{\tau_2} + \left(\frac{x}{L_2}\right)^{\mu_2} = 1 & \text{плоскость } XOZ \end{cases} \quad (1)$$

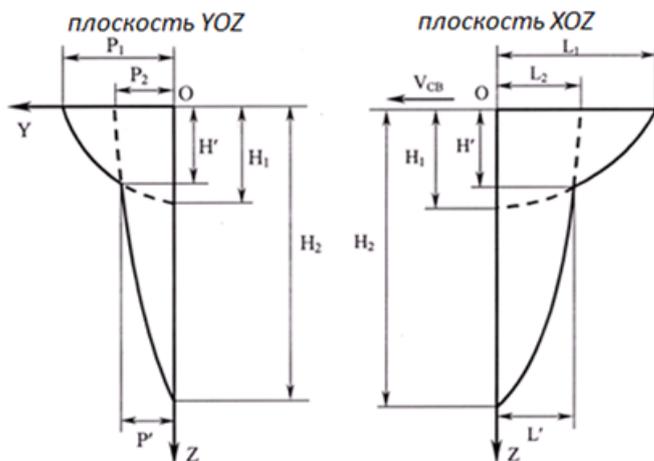


Рисунок 1 - Схематическое разделение фронта кристаллизации на составные части: P' , H' и L' – координаты точки пересечения двух кривых (точки перегиба); P_2 , H_1 и L_2 – значения, при которых кривые пересекают соответствующие координатные оси; P_1 – соответствует значению полуширины шва, H_2 – соответствует глубине шва, L_1 – численно равно длине сварочной ванны на поверхности

Коэффициенты и параметры системы уравнений фронта кристаллизации (1) определяются посредством аппроксимации численных значений (x_i, y_i, z_i) изотермической поверхности кристаллизации, полученных при решении тепловой задачи ЭЛС, с данной системой уравнений. При этом коэффициенты ω , θ , η , ν , τ , μ могут иметь любое не целое значение больше 1. Уравнения для расчета формы осей кристаллитов позволяют построить проекции осей кристаллитов на координатные плоскости и качественно оценить первичную макроструктуру металла шва. Значения координат начала роста кристаллита (x_0, y_0, z_0) определяются с учетом уравнений системы (1):

$$\begin{cases} y = \left[\frac{H^\omega \cdot (\theta^2 - 2\theta)}{P^{2\theta} \cdot (\omega^2 - 2\omega)} (z^{2-\omega} - z_0^{2-\omega}) + y_0^{2-\theta} \right]^{1/(2-\theta)} & \text{плоскость } YOZ \\ x = \left[\frac{P^\eta \cdot (\nu^2 - 2\nu)}{L^\nu \cdot (\eta^2 - 2\eta)} (y^{2-\eta} - y_0^{2-\eta}) + x_0^{2-\nu} \right]^{1/(2-\nu)} & \text{плоскость } XOY \\ x = \left[\frac{H^\tau \cdot (\mu^2 - 2\mu)}{L^\mu \cdot (\tau^2 - 2\tau)} (z^{2-\tau} - z_0^{2-\tau}) + x_0^{2-\mu} \right]^{1/(2-\mu)} & \text{плоскость } XOZ \end{cases} \quad (2)$$

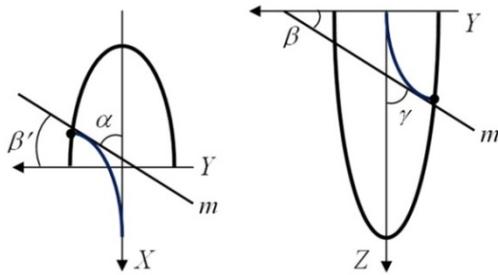


Рисунок 2 - Направляющие углы касательных к оси кристаллита

Изменения углов наклона осей кристаллитов характеризуют пространственную ориентацию кристаллитов и позволяют численно определить изменения скорости их роста (рисунок 2). Для анализа первичной макроструктуры наиболее показательными являются изменения углов наклона осей кристаллитов, растущих на

разной глубине к оси шва в горизонтальной плоскости (α) и вертикальной плоскости (γ).

Изменения скорости роста кристаллитов по ширине шва в горизонтальной ($V\alpha_{кр}$) и вертикальной ($V\gamma_{кр}$) плоскостях определяются следующим образом:

$$V\alpha_{кр} = V_{св} \left[1 + \frac{x_0^2 \cdot \eta^2}{y_0^2 \cdot \nu^2} Ky^{2\eta-2} (1 - Ky^\eta)^{\frac{2}{\nu}-2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$V\gamma_{кр} = V_{св} \left[1 + \frac{H^{2\omega} \cdot \theta^2 (Ky \cdot y_0)^{2\theta-2}}{P^{2\theta} \cdot \omega^2 z_0^{2\omega-2}} (1 - Ky^\theta)^{\frac{2}{\omega}-2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Для суммарной количественной оценки схемы кристаллизации и формирующейся первичной макроструктуры при ЭЛС определены два интегральных критерия $K\alpha$ и $K\gamma$. $K\alpha$ характеризует преимущественное направление осей кристаллитов по ширине шва в горизонтальной плоскости; $K\gamma$ характеризует преимущественное направление осей кристаллитов по ширине шва в вертикальной плоскости.

Количественная оценка скорости роста кристаллитов осуществляется с помощью двух интегральных критериев скорости кристаллизации – $KV\alpha$ и $KV\gamma$, характеризующих суммарное значение относительной скорости роста кристаллитов $K_{кр}/K_{св}$ по ширине шва в горизонтальной и вертикальной плоскости:

$$KV\alpha = \int_0^1 \left[1 + \frac{H^{2\omega} \cdot \theta^2 (Ky \cdot y_0)^{2\theta-2}}{P^{2\theta} \cdot \omega^2 z_0^{2\omega-2}} (1 - Ky^\theta)^{\frac{2}{\omega}-2} \right]^{-1/2} dKy, \quad (5)$$

$$KV\gamma = \int_0^1 \left[1 + \frac{H^{2\omega} \cdot \theta^2 (Ky \cdot y_0)^{2\theta-2}}{P^{2\theta} \cdot \omega^2 z_0^{2\omega-2}} (1 - Ky^\theta)^{\frac{2}{\omega}-2} \right]^{-1/2} dKy. \quad (6)$$

Полученные универсальные уравнения позволили установить влияние формы и размеров фронта кристаллизации на формирующуюся макроструктуру и определить качественные и количественные показатели её оценки (рисунок 2). При глубоком проплавлении возможно проявление плоского и пространственного процесса кристаллизации, а в структуре металла шва образование столбчатых и равноосных полиэдрических зерен.

Форма и размеры фронта кристаллизации в плоскости YOZ влияют на проявление характера процесса кристаллизации (плоский или пространственный). При уменьшении угла наклона стенок шва, а также увеличении глубины шва с параллельными стенками, возрастает глубина шва с плоским процессом кристаллизации.

На образование равноосной макроструктуры оказывает влияние форма и размеры фронта кристаллизации в плоскостях XOY и YOZ . При изменении формы от заостренной клиновидной до более округлой происходит образование центральной зоны с полиэдрической макроструктурой и увеличение ширины данной зоны. Степень неоднородности характера процесса кристаллизации и формирующейся макроструктуры по глубине сварного шва зависит от формы фронта кристаллизации в плоскостях XOZ и уменьшается при изменении формы от клиновидной до округлой.

В работе определены численные значения показателей, характеризующих макроструктуру металла шва при глубоком проплавлении.

ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИКИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, В.А. ОКОВИТЫЙ, В.М. АСТАШИНСКИЙ, В.В. УГЛОВ, С.Б. СОБОЛЕВСКИЙ, В.В. ОКОВИТЫЙ

Белорусский Национальный Технический Университет, Беларусь, г. Минск

E-mail: vasil_ok@inbox.ru

В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи и фракционного состава исходного порошка на характеристики двухслойных композиционных покрытий на основе никель-алюминия, оксида алюминия и диоксида циркония на элементах защитных экранов. Проведена оптимизация на основании получения максимального коэффициента использования порошка. Сравнительный анализ зависимости коэффициента использования порошка вязких металлических слоев никель-хрома и никель-алюминия от дистанции напыления показывает, что при аналогичном характере кривых представленных зависимостей по абсолютной величине значения коэффициента использования порошка больше при оптимальных режимах для порошка никель-хрома. Это можно объяснить высокой пластичностью последнего и соответственно меньшим отскоком соударяющихся с подложкой частиц. Приведены результаты исследований микроструктуры поперечных сечений сформированных покрытий, выполненных с использованием растровой электронной микроскопии. Рассмотрены микроструктуры поперечных сечений покрытия ZrO_2 и промежуточного слоя Ni–Al. Из представленных данных видно, что в исходном состоянии покрытие характеризуется пористостью, причем средний размер пор составляет несколько микрометров и в некоторых областях достигает 20 мкм. Микроструктура слоя Ni–Al характеризуется меньшей пористостью. Воздействие на напыленное покрытие компрессионных плазменных потоков приводит к формированию переплавленного слоя оксида толщиной 12–15 мкм, способствует сглаживанию рельефа поверхности и образованию на поверхности трещин, распространяющихся преимущественно в глубину покрытия. Обработка оксидных покрытий компрессионной плазмой приводит также к снижению их пористости.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВЫХ БИМЕТАЛЛОВ, ОСНОВАННЫХ НА РАСПЛАВЛЕНИИ ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ И ОБРАЗОВАНИИ СОЕДИНЕНИЯ СЛОЁВ В ТВЁРДОЙ ФАЗЕ

Д.Б. ПЕРВУХИН, О.Л. ПЕРВУХИНА, Т.А. ШИШКИН

ООО "Битруб Интернэшнл", Московская обл., г. Красноармейск

E-mail: bitrub@mail.ru

Основными задачами в технологии производства биметаллических и многослойных металлов являются создание прочного соединения составляющих по всей поверхности контакта при заданном соотношении толщины слоев, формирование требуемых структуры и свойств каждого из слоев и биметалла в целом. Отсутствие качественной связи между слоями по всей поверхности соединения может вызвать расслоения в процессе изготовления оборудования из двухслойного проката, в частности; при выполнении операций гибки, резки, правки, холодной и горячей деформации, а также сварки. В настоящее время, как в отечественной, так и в зарубежной практике при производстве биметаллов нашли применение методы, основанные на расплавлении лакирующего слоя (электродуговая наплавка, электрошлаковая наплавка с последующей прокаткой) и на образовании соединения слоёв в твёрдой фазе.

В докладе на основании анализа опубликованных данных и опыта промышленного производства биметаллов для важнейших отраслей машиностроения дана характеристика этих методов, показаны их преимущество и недостатки, а также наиболее рациональные области применения. Особое внимание уделено опыту производства и применения сварки взрывом при производстве крупногабаритного биметалла для нефтехимического, атомного и металлургического машиностроения

NON-VACUUM ELECTRON-BEAM SURFACING OF COATINGS WITH THE ULTRAFINE STRUCTURE

M.V. PEROVSKAYA, I.M. POLETIKA, V.V. SHMAKOV

Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, Tomsk

E-mail: mv_perovskaya@inbox.ru

The paper employs the ELV-6 accelerator to surface low-carbon steel with the tungsten carbide powder thus obtaining steel coatings with high hardness but low wear resistance. The abrasive wear resistance is considerably increased by changing the composition of the surfacing mixture due to the introduction of nickel as an austenite stabilizer and titanium carbide as a modifier. Besides, the paper deals with surfacing with a powder mixture of chromium carbide, chromium, and titanium carbide to produce bifunctional coatings with both high wear and corrosion resistance, which is explained by the presence of chromium in the layer. The methods of physical metallurgy are used to study mechanisms responsible for property changes. A substantial increase in wear resistance is shown to be related to the ductile austenitic structure formed in the deposited layer matrix when nickel is introduced and to rapid structure refinement in the presence of multiple centers of crystallization represented by dispersed precipitates TiC.

The work was carried out in the framework of the Basic Research Program of the State Academies of Sciences for 2013–2020 (Project No. 23.2.1).

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НОВЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Г.В. ПЕТРИШИН¹, В.М. БЫСТРЕНКОВ¹, В.А. СИДОРОВ²

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

E-mail: petrishin@gstu.by

Магнитно-электрические защитные покрытия, обладая высокой износостойкостью и невысокой себестоимостью, успешно применяются для повышения срока службы быстроизнашивающихся элементов машин, работающих в условиях абразивного изнашивания, при сухом трении скольжения [1]. При этом для ряда элементов сельскохозяйственной техники необходима высокая износостойкость в условиях абразивного изнашивания при наличии ударных нагрузок (например, почвообрабатывающие элементы). В таком случае помимо высокой твердости, защитные покрытия должны обладать хорошей релаксирующей способностью, обеспечивающей поглощение энергии удара и сохранение целостности покрытия. Известно, что в технологии магнитно-электрической наплавки успешно применяются самофлюсующиеся порошковые материалы на основе отходов металлообработки [2], однако оценки их эффективности при ударно-абразивном изнашивании не производилось. Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на разработку новых составов порошковых смесей для технологии магнитно-электрической наплавки, обеспечивающие высокую износостойкость в сложных условиях изнашивания.

Целью данной работы является установление эксплуатационных свойств магнитно-электрических покрытий в зависимости от состава применяемых порошковых смесей.

В качестве подложки использовалась сталь 65Г, наиболее широко применяемая для изготовления почвообрабатывающей техники. В качестве наплавочных материалов использовались порошковые смеси на основе диффузионно-борированных дисперсных металлических отходов с содержанием измельченных отходов твердого сплава ВК-3 следующих составов: №1 - борированная стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №2 - 10% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №3 - 20% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №4 - 30% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №5 - 40% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; во всех смесях фракция порошкового материала составляла 315...400 мкм. В качестве эталона использовалась сталь 65Г, подвергнутая закалке и среднему отпуску до HRCэ 55. Исследования производились на лабораторной установке, имитирующей ударно-абразивное изнашивание (рисунок 1), в качестве абразива применялся карьерный песок. Магнитно-электрические покрытия наносились на технологических режимах, рекомендованных в [1].



Рисунок 1 – Установка для испытаний на ударно-абразивное изнашивание
Интенсивность изнашивания I_M оценивали на единицу времени:

$$I_M = \Delta m/t \text{ (мг/мин) (1)}$$

Результаты исследований скорости ударно-абразивного изнашивания приведены на рисунке 2.

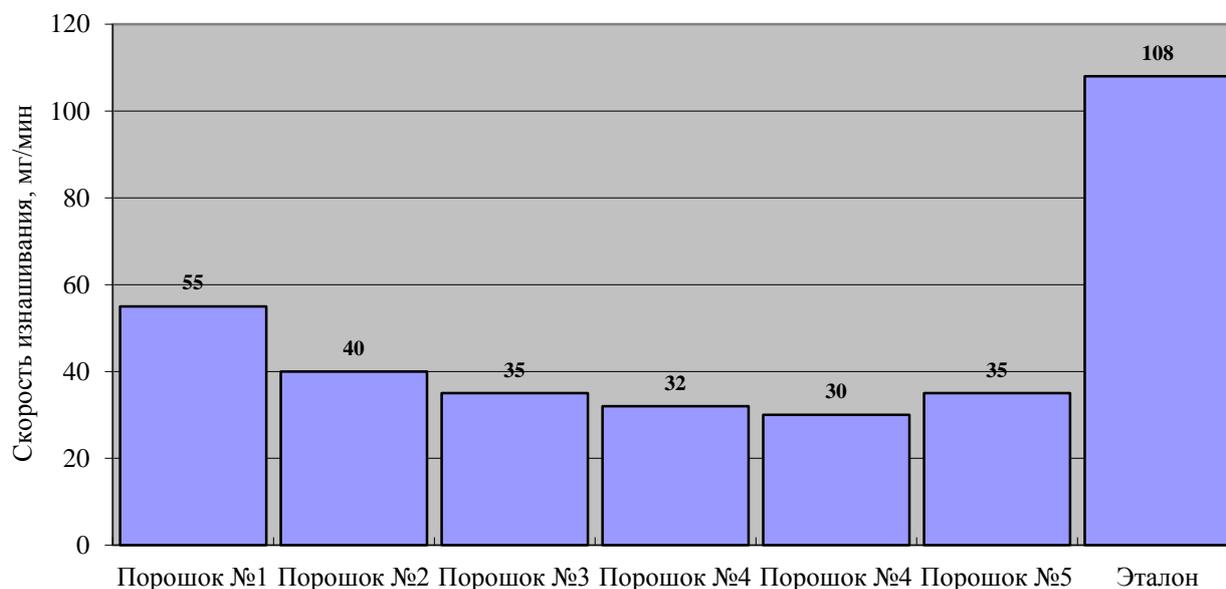


Рисунок 2 – Влияние состава наплавочного порошкового материала на скорость ударно-абразивного изнашивания магнитно-электрических покрытий

Как видно из диаграммы, внесение в состав порошковой смеси 10 % масс. существенно снижает скорость изнашивания покрытий, что объясняется резким ростом микротвердости магнитно-электрических покрытий из таких порошковых смесей. Дальнейшее увеличение содержания карбидов вольфрама приводит к монотонному снижению скорости изнашивания, однако при их содержании более 40% масс. наблюдается увеличение скорости изнашивания. Исследования изношенной поверхности показали наличие на их поверхности микротрещин и сколов, что и объясняет рост скорости изнашивания. Во всех случаях износостойкость покрытий оказалась выше износостойкости эталона. Таким образом, магнитно-электрические покрытия из новых порошковых смесей на основе борированных дисперсных металлических отходов показали высокую износостойкость в условиях ударно-абразивного изнашивания, максимальную износостойкость показали покрытия из порошковых смесей, содержащих 30% масс. карбидов вольфрама.

Список литературы

1. Пантелеенко Ф.И. Технологические режимы магнитно-электрического упрочнения с использованием диффузионно-легированного стального порошка // Ф.И. Пантелеенко, Г.В. Петришин, Е.Ф. Пантелеенко // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – № 4. – 2006. – С. 69-75.
2. Петришин Г.В. Диффузионно-легированные порошки для магнитно-электрического упрочнения // Г.В. Петришин, А.Ф. Пантелеенко, Е.Ф. Пантелеенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 4. – 2006. – С. 26-31.

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ САМОФЛЮСУЮЩИМИСЯ ПОРОШКОВЫМИ СМЕСЯМИ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ И КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Г.В. ПЕТРИШИН¹, А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО², В.М. БЫСТРЕНКОВ¹, Д.В. МЕЛЬНИКОВ¹

¹ Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель, Беларусь,

² Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

E-mail: petrishin@gstu.by

Для повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей машин, работающих в сложных условиях изнашивания, характеризующихся ускоренным изнашиванием, применяют технологии наплавки защитных покрытий, обеспечивающие формирование слоя толщиной более 3 мм. Для решения таких задач применяют широко технологии плазменной наплавки, электродуговой наплавки с среде защитных газов, газопламенной наплавки с использованием присадочных материалов [1]. Высокую износостойкость в условиях агрессивных сред, характеризующихся абразивным, коррозионным изнашиванием, а также наличием ударных нагрузок, показывают покрытия, полученные газопламенной наплавкой шнуровых материалов на основе никеля и карбидов вольфрама. Данные покрытия наиболее широко распространены для защиты элементов строительного оборудования ввиду их высокой износостойкости и простоты применяемого технологического оборудования. Однако применяемые наплавочные материалы довольно дороги, а технология их наплавки трудоемка, так как производительная электродуговая наплавка для данных материалов запрещена, а наплавка ацетиленовой горелкой малопроизводительна. На производстве имеют место случаи, когда наплавка таких материалов осуществляется в нарушение технологии ручной дуговой наплавкой при силе тока до 70 А. В таких случаях незначительно снижается твердость ввиду выгорания карбидов вольфрама, но существенно повышается производительность процесса. Ввиду этого актуальной является задача разработки новых недорогих материалов для электродуговой наплавки износостойких покрытий, а также технологии наплавки, обеспечивающей формирование качественных покрытий, обладающих высокой износостойкостью в сложных условиях изнашивания.

Целью данной работы являлась разработка технологии электродуговой наплавки самофлюсующимися порошковыми смесями на основе дисперсных металлических отходов и карбида вольфрама.

Самофлюсующиеся борированные порошковые смеси на основе отходов металлообработки обеспечивают высокую износостойкость покрытий, полученных технологией магнитно-электрической наплавки. Для технологии электродуговой наплавки разработаны новые составы порошковых смесей на основе борированных дисперсных металлических отходов и измельченных отходов твердого сплава ВК-3. В данной работе исследовались следующие порошковые смеси: №1 - борированная стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №2 - 10% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №3 - 20% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №4 - 30% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №5 - 40% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс.; №6 - 55% масс. карбида вольфрама, остальное - стальная дробь с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс. во всех смесях фракция порошкового материала составляла 0,8...1,2 мм. Твердость покрытий по Виккерсу измерялась на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 0,96 Н. Электродуговая наплавка осуществлялась на лабораторной установке с использованием инвертора модели ММА200 и неплавящегося угольного электрода диаметром 6 мм. Наиболее существенным фактором, определяющим свойства наносимых покрытий, является сила технологического тока, А, которая при наплавке регулировалась в пределах от 50А до 150 А. Влияние силы технологического тока на твердость HV наносимых покрытий приведена на рисунке 1.

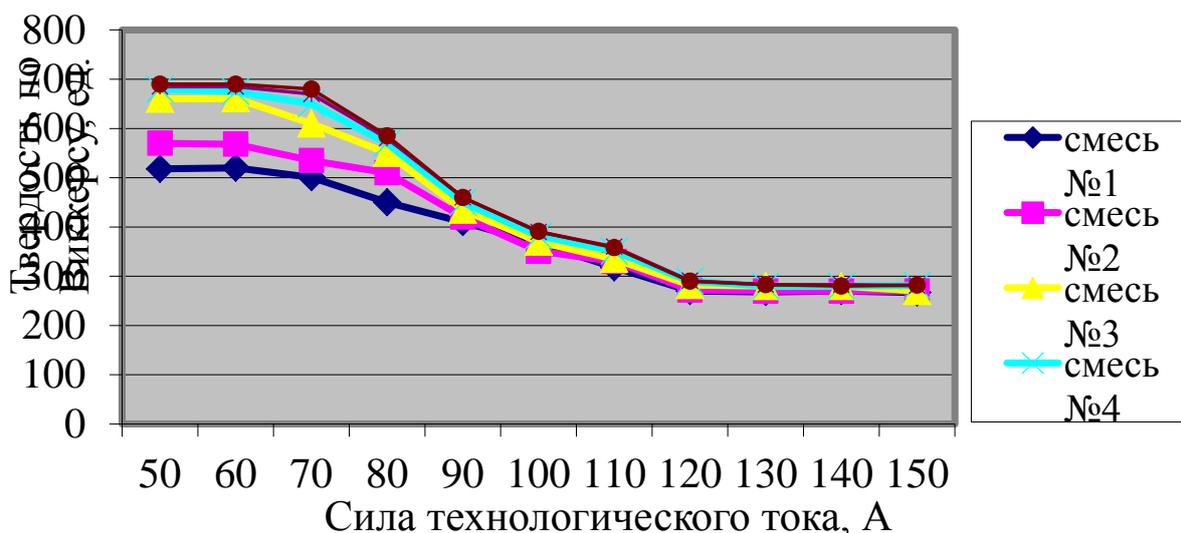


Рисунок 1 – Влияние силы технологического тока на микротвердость электродуговых покрытий из порошковых смесей на основе дисперсных металлических отходов

Исследования микроструктуры покрытий показали, что высокую твердость обуславливают бориды железа и карбиды вольфрама, распределенные в металлической матрице (рисунок 2).

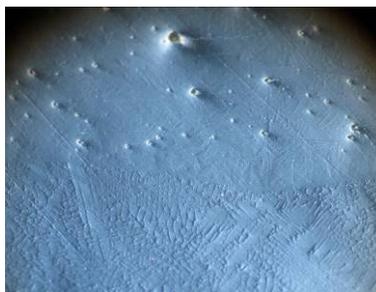


Рисунок 2 – Микроструктура электродуговых покрытий с карбидами вольфрама

Как показали исследования, сила технологического тока оказывает существенное влияние на микротвердость наносимых покрытий, и при достижении значений 90 А значительно снижает твердость наплавляемых покрытий. Наплавка на больших токах позволяет получить большую толщину покрытий и повысить производительность, но приводит к выгоранию боридов железа и карбидов вольфрама, обуславливающих высокую микротвердость данных покрытий. При достижении тока 120 А твердость покрытий сравнима с твердостью подложки, что говорит о полном выгорании твердых фаз в покрытиях. Исследования показали, что для обеспечения максимальной твердости покрытий при их толщине не менее 3 мм следует производить наплавку при токах 60...70А при условии использования исследуемых порошковых смесей. Существенный рост твердости покрытий обеспечивает внесение до 20% карбидов вольфрама, дальнейшее увеличение их содержания приводит к незначительному росту твердости.

Список литературы

1. Восстановление и упрочнение деталей: справочник / Горохов В.А., Витязь П.А., Иванов В.П., Ивашко В.С., Кастрюк А.П., Константинов В.М., Лялякин В.П., Пантелеенко Ф.И., под общ. ред. Пантелеенко Ф.И. – Москва: Наука и технологии, 2013. – 367 с.
2. Г.В. Петришин, А.Ф. Пантелеенко, Е.Ф. Пантелеенко Диффузионно-легированные порошки для магнитно-электрического упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 4. – 2006. – С. 26-31.

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ НОВЫМИ САМОФЛЮСУЮЩИМИСЯ ПОРОШКОВЫМИ СМЕСЯМИ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Г.В. ПЕТРИШИН¹, Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО^{2,3}, Е.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО²

¹ Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Беларусь, г. Гомель

² Белорусский национальный технический университет, Беларусь, г. Минск

³ Люблинский католический университет Яна Павла II, Польша, г. Люблин

E-mail: petrishin@gstu.by

Для повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей машин широко применяются различные технологии нанесения защитных покрытий, обеспечивающих получение необходимых свойств поверхности. В машиностроении для таких целей используются, в основном, технологии газопламенного напыления или плазменной наплавки, а также менее дорогие технологии полуавтоматической наплавки в среде углекислого газа. Для них разработана гамма порошковых или проволоочных материалов, обеспечивающих получение необходимых характеристик покрытий твердость, коррозионная стойкость, антифрикционность и др. Для обеспечения износостойкости элементов почвообрабатывающей техники, измельчающих аппаратов сельскохозяйственной техники, дорожно-строительной техники, работающих в сложных условиях изнашивания, хорошо зарекомендовали себя покрытия, получаемые методом магнитно-электрической наплавки [1]. Данная технология основана на одновременном воздействии на наплавочные материалы энергией магнитного поля и концентрированным импульсным дуговым разрядом. Такое сочетание обуславливает взрывной характер процесса, при котором цепочки из частиц порошка, выстроенные в магнитном поле, плавятся, диспергируются и переносятся на деталь импульсом дугового разряда. Несмотря на очевидные достоинства, для технологии магнитно-электрической наплавки не разработаны специальные наплавочные материалы, и в ней используются различные порошки, начиная от ферросплавов (ферробор, феррохромбор и др.) и заканчивая измельченными проволоочными присадочными материалами. Известно успешное применение в данной технологии порошковых материалов на основе борированной стальной дроби при изнашивании в условиях трения скольжения [2]. При этом для обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик деталей машин, работающих в различных условиях изнашивания, необходимо разработать гамму наплавочных материалов для различных типов деталей, а также установить необходимые технологические режимы магнитно-электрической наплавки для порошковых смесей различного состава и размера частиц.

Целью данной работы была разработка технологических режимов магнитно-электрической наплавки покрытий из порошковых смесей на основе борированных дисперсных металлических отходов.

В данном исследовании в качестве наплавочных материалов использовались порошковые смеси следующего состава (фракция порошкового материала 315...400 мкм):

1. 98% масс. борированной стальной дроби с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс., 2 карбида кремния;
2. 93% масс. борированной стальной дроби с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс., 5% масс. измельченного карбида вольфрама, 2 карбида кремния;
3. 88% масс. борированной стальной дроби с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс., 10% масс. измельченного карбида вольфрама, 2 карбида кремния;
4. 83% масс. борированной стальной дроби с содержанием бора $8,0 \pm 0,8\%$ масс., 15% масс. измельченного карбида вольфрама, 2 карбида кремния;

Магнитно-электрическая наплавка осуществлялась на лабораторной установке для плоских поверхностей, без стабилизации рабочего зазора. Наиболее существенным фактором, определяющим свойства наносимых покрытий, является плотность разрядного тока, A/mm^2 , которая при наплавке с использованием сварочного выпрямителя ВДУ-600

регулируется напряжением холостого хода и силой технологического тока. Влияние плотности разрядного тока на микротвердость наносимых покрытий приведена на рисунке 1

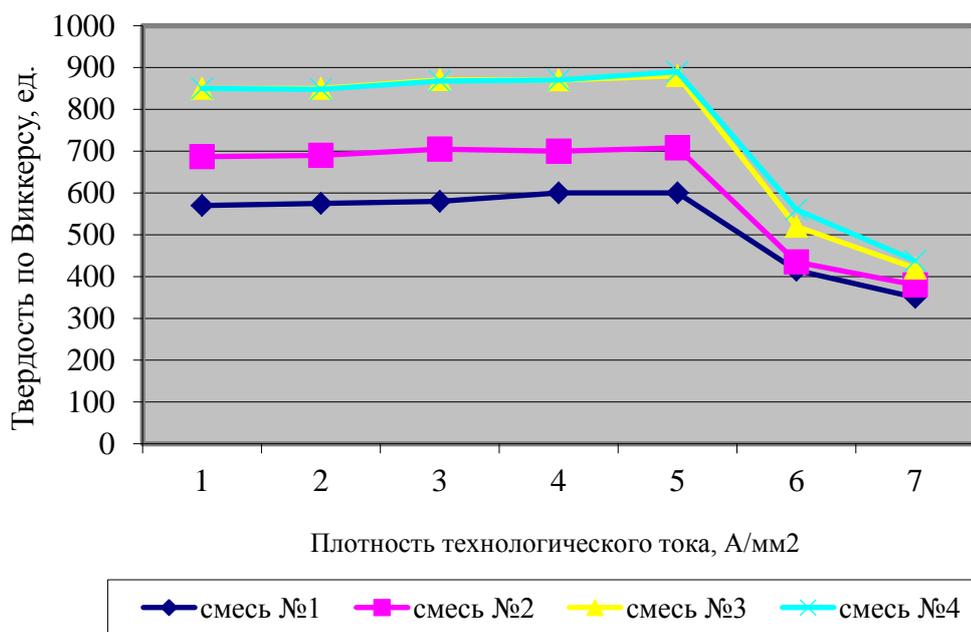


Рисунок 1 – Влияние плотности технологического тока на микротвердость магнитно-электрических покрытий из порошковых смесей на основе дисперсных металлических отходов

Как показали исследования, плотность технологического тока оказывает существенное влияние на микротвердость наносимых покрытий, и при достижении значений 6-7 А/мм² делает бессмысленным процесс наплавки, так как в этом случае твердость покрытий сравнима с твердостью подложки. Объясняется это существенным перегревом материала покрытий, что приводит к выгоранию боридов железа и карбиды вольфрама, обуславливающих высокую микротвердость данных покрытий и особую, гетерогенную структуру покрытий [3]. Следует также отметить, что повышение плотности тока приводит к росту сплошности покрытий и их толщины, что позволяет выбрать технологические режимы наплавки, обеспечивающие высокую сплошность покрытий из порошковых смесей на основе дисперсных металлических отходов при необходимых значениях их микротвердости: плотность тока 4,5...5 А/мм² обеспечивает твердость по Виккерсу на уровне 850 единиц при использовании порошковых смесей на основе дисперсных металлических отходов, содержащих 10...15% карбидов вольфрама, при этом обеспечивается высокая сплошность покрытий, что обеспечивает высокую износостойкость изделий в условиях абразивного изнашивания.

Список литературы

1. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск: БГАТУ, 2016. – 236 с.: ил. – ISBN 978-985-519-817-9.
2. Петришин, Г.В. Диффузионно-легированные порошки для магнитно-электрического упрочнения // Г.В. Петришин, А.Ф. Пантелеенко, Е.Ф. Пантелеенко. // Упрочняющие технологии и покрытия. – №4. – 2006. – С. 26-31.
3. Пантелеенко, Ф.И. Технологические режимы магнитно-электрического упрочнения с использованием диффузионно-легированного стального порошка // Ф.И. Пантелеенко, Г.В. Петришин, Е.Ф. Пантелеенко. Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – № 4. – 2006. – С. 69-75.

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ШТУЦЕРОВ И ПАТРУБКОВ МАЛОГО (ДО 80 ММ) ДИАМЕТРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю.В. ПОЛЕТАЕВ, В.В. ЩЕЛКИН

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону
E-mail: anclav51@mail.ru

Целью настоящей работы является исследование и разработка технологии сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра корпусного оборудования энергетических установок, взамен ручной дуговой сварки (РДС) покрытым электродом. Способ РДС не обеспечивает требуемого стабильного качества и механических свойств сварных соединений. Решение этой проблемы возможно на основе применения процесса сварки трением с малым тепловложением. Учитывая недостаточную теоретическую и экспериментальную изученность проблемы, необходимо было решить следующие научно-технические задачи: разработать конструктивное оформление моделей и соединяемых (конусных) поверхностей штуцерных и патрубковых узлов; обосновать выбор оптимальных углов подготовки поверхностей под сварку; обосновать выбор и экспериментально подтвердить значения параметров режима сварки; выполнить оценку качества сварных соединений неразрушающими и разрушающими методами контроля.

Установлено влияние конструктивного и технологического факторов на качество сварных соединений. Разработанная технология обеспечила формирование качества и механических свойств сварных соединений из стали 22К, на уровне требований нормативного документа ПН АЭГ-7-010-89. «Правила контроля. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки».

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ НИКЕЛИД ТИТАНА

А.И. ПОТЕКАЕВ¹, С.В. ГЮНТЕР¹, А.А. САПРЫКИН², Е.А. ИБРАГИМОВ², А.А. КЛОПОТОВ^{1,3},
С.В. ГАЛСАНОВ¹, К.М. ДУБОВИКОВ¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск,

²Юргинский технологический институт (филиал) «Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Юрга

³Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

E-mail: guntersv@inbox.ru

Сплавы на основе никелида титана TiNi(MoFe) используемые в медицине, обладают комплексом уникальных свойств сверхэластичности и памяти формы. Вместе с этим материал сочетает высокий уровень химической стойкости в условиях изменения напряжения, температуры и деформации. В настоящее время данная проволока (нить) диаметром от 100 до 40 мкм, находит широкое применение в различных областях медицины [1]. Из тонкой проволоки изготавливают шовный материал, металлическую ткань и вязаные сетки различного назначения, которые успешно используют в медицине (рисунок 1) [1-3]. При практическом применении тонкой проволоки из сплавов TiNi(Mo,Fe) возникает необходимость проводить их сварные соединения. В связи с этим, задача разработки технологии получения сварных соединений из тонкой никелид титановой проволоки является в настоящее время актуальной. Ранее нами уже была проведена работа в этом направлении [4] и установлено, что для решения этой задачи необходимы структурные исследования.

Цель настоящей работы представить результаты структурных исследований сварного соединения тонкой проволоки из сплава TiNi(Mo,Fe), полученного при помощи лазерной сварки.

Одним из методов, успешно применимых для решения этой задачи является метод лазерной сварки. Это обусловлено особенностями использования энергии лазерного излучения для сварки: локальный характер теплового воздействия, минимальная термическая деформация, широкий диапазон регулирования энергетических характеристик лазерного луча, возможность получения качественных сварных швов на широком классе материалов [5].

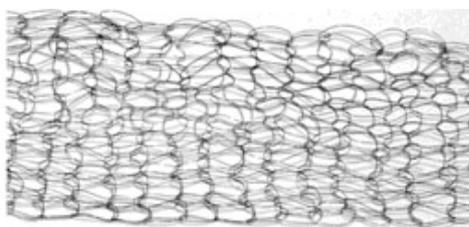


Рисунок 1 - Вязаный материал из сверхэластичной проволоки d (40–100 мкм)

Сварные соединения проводили на тонкой проволоки из сплава TiNi(Mo,Fe) сечением 160 мкм, полученные путем многократного волочения через фильеры с определенным шагом и последующим кратковременным нагревом от 500 до 800°C [3].

Для сварки использовали лазерный луч от иттербиевого волоконного лазера ЛК-100-В. Лазерный луч имеет следующие параметры: длительность импульса пучка 30 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, мощностью луча 10 Вт, диаметр пятна лазерного излучения $d_{л.и.}=100$ мкм. Структуру сварных швов исследовали при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA3 TESCAN.

На рисунке 2, а приведена схема, согласно которой были созданы сварные соединения из двух тонких проволок при помощи лазерного луча. Применение такого метода позволило получить хорошее сварное соединение. Это визуально видно на микрофотографии, представленной на рис. 2, б. Данные, полученные сканирующим электронным микроскопом, позволили установить, что при сплавлении двух проволок в области воздействия лазерного луча проявляется композиционный характер строения тонкой проволоки, состоящий из сердцевины сверхэластичного сплава TiNi(Mo,Fe) и оболочки – группы оксидов титана [3] (рис. 3).

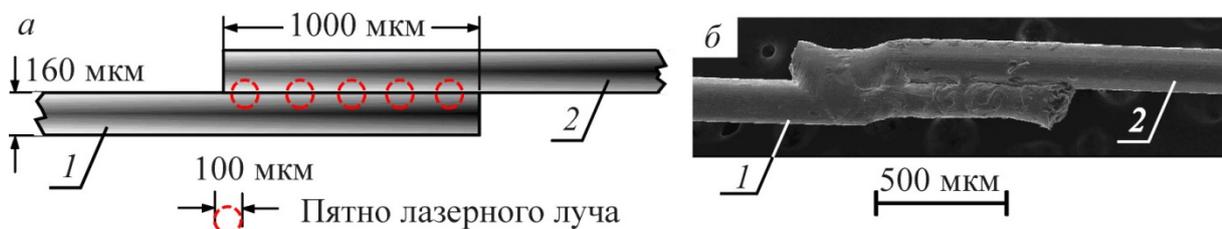


Рисунок 2 - Схема сварного соединения двух тонких проволок 1 и 2 сплава TiNi(Mo,Fe) (а) и микрофотография сварного соединения тонких проволок 1 и 2 (б)

Так, например, на приведенной, на рис. 3 микрофотографии с локального участка воздействия лазерного луча, проявились особенности взаимодействия лазерного луча с таким композиционным материалом. А именно, они обусловлены тем, что в процессе взаимодействия лазерного луча с композиционным материалом происходят одновременно несколько разных процессов.

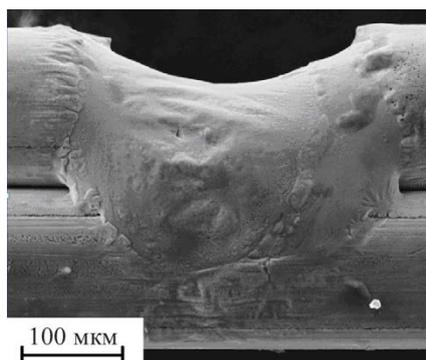


Рисунок 3 - Микрофотография участка сплавления двух нитей в области воздействия лазерным лучом

Отметим два основных. Первый процесс происходит в результате передачи тепловой энергии при взаимодействии лазерного излучения с материалом и его перевод в локальном месте в жидкое состояние с образованием многофазной жидкости. Второй процесс связан с химическими реакциями, которые происходят в результате мгновенного нагрева и столь же быстрого охлаждения. На микрофотографии можно выделить характерные зоны взаимодействия лазерного излучения с материалом проволоки (рисунок 3). Хорошо видна зона в центре лазерного кратера, которая была образована в результате расплавления, а затем кристаллизации узкого слоя расплавленного матричного сплава. Другая зона как раз на краю лазерного кратера, показывает четко границу «жидкая фаза - твердый материал» и отражает процесс взаимодействия оболочки из оксида титана с основным расплавленным металлом проволоки.

Список литературы

1. Радкевич А.А., Гюнтер В.Э., Каспаров Э.В. и др. Устранение дефектов костей свода черепа с использованием материалов с памятью формы. Имплантаты с памятью формы. – 2018. – № 1–2. – С. 5–10.
2. Чекалкин Т.Л., Клопотов А.А., Николаев А.Ю., Гюнтер В.Э. Влияние предварительной нагрузки на параметры многократного эффекта памяти формы // Биосовместимые сверхэластичные материалы и новые медицинские технологии в медицине. – 2004. – С. 404–407.
3. Gyunter, V.E., Marchenko, E.S., Gyunter, S.V., Baigonakova, G.A. The influence of the surface layer on the combination of properties of thin TiNi alloy wires // Technical Physics Letters (2018) 44: 811.
4. Гюнтер С.В., Сапрыкин А.А., Ибрагимов Е.А., Клопотов А.А., Потеев А.И. и др. Особенности лазерной сварки тонкой проволоки из сплава на основе никелида титана. Труды V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019. Часть 2. М.: НИЯУ МИФИ. 2019. С. 308-310.
5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов. Т.5. М.: Высшая школа, 1988. –207 с.

EBSD-АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО ШВА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ МЕДНОЙ ВСТАВКОЙ: CONFERENCE SERIES

Н.Б. ПУГАЧЕВА¹, Н.С. МИЧУРОВ¹, Е.И. СЕНАЕВА^{1,2}

¹Институт машиноведения Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

²Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

E-mail: nat@imach.uran.ru

Интерес к лазерной сварке разнородных материалов продиктован стремлением разработчиков высокоскоростных транспортных средств уменьшить вес конструкций [1]. Основной проблемой являются существенные различия теплофизических свойств соединяемых сплавов и ограниченная растворимость разных металлов друг в друге. Примером таких соединений является сварка аустенитной хромоникелевой стали и титановых сплавов. Основным требованием при сварке разнородных сплавов является получение прочности сварного шва (СШ) на уровне одного из соединяемых сплавов. В случае сварки хромоникелевых сталей с титановыми сплавами чаще всего наименьшей прочностью обладают последние, поэтому стремятся получить прочность СШ на уровне значений для титановых сплавов. В системе Fe-Ti неизбежно формирование частиц интерметаллидов, обладающих высокой твердостью и не способных пластически деформироваться при внешнем нагружении. Образование интерметаллидов FeTi и Fe₂Ti является причиной формирования трещины в СШ сразу после его охлаждения до комнатных температур [2]. Достаточно перспективные результаты получены при использовании промежуточных вставок Cu и сплавов на её основе [3 – 5]. Однако до сих пор отсутствуют обоснованные представления о фазовом составе СШ, гарантирующем требуемую прочность.

Цель работы – определить структурное состояние сварного шва листов стали 12X18H10T и сплава BT1-0 с медной вставкой, обеспечивающее прочность соединения на уровне одного из соединяемых материалов.

Лазерную сварку листов толщиной 3 мм стали 12X18H10T и сплава BT1-0 с промежуточной медной вставкой проводили CO₂-лазером в ИТПМ им. С.А. Христиановича. В ранее проведенных исследованиях [3 – 5] было показано, что варьированием параметров сварки возможно получение различной доли растворения соединяемых материалов в сварочной ванне, а также различной степени перемешивания разнородных материалов в сварочной ванне. Для исследований были выбраны СШ, характеризующие три крайних варианта структурного состояния: 1) соединение с дендритным строением сварного шва, 2) соединение с равномерным перемешиванием в зоне сварного шва и 3) соединение без перемешивания, полученное по режиму пайки. Структуру сварных швов исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU. Фазовый состав СШ определяли методом EBSD-анализа при помощи приставки к микроскопу Oxford NordlysMax² с программным комплексом Aztec. Микрорентгеноспектральный анализ проводили при помощи приставки энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD детектором. Испытания прочности соединений выполняли на машине INSTRON 8801.

Показано, что формирование дендритной структуры материала СШ, как и получение соединения в режиме пайки не позволяют выполнить требование получения прочности соединений на уровне одного из соединяемых материалов. В случае дендритной структуры СШ прочность соединения ограничена образованием большого количества интерметаллидов (Fe,Cr)₂Ti в осях дендритов и малой долей узких прослоек твердого раствора на основе меди в междендритных пространствах, $\sigma_b = 180$ Мпа. В случае пайки прочность соединения определяется прочностью медной пластины, в которой не растворяются соединяемые материалы – сталь и титановый сплав, $\sigma_b = 156$ МПа.

Режим сварки, позволяющий получить равномерное перемешивание расплавляемых материалов в сварочной ванне, обеспечил образование в СШ пересыщенного твердого раствора на основе меди с небольшим количеством интерметаллидов $(\text{Fe,Cr})_2\text{Ti}$ и Cu_3Ti . Каждая из частиц интерметаллидов окружена твердым раствором, что исключает возможность появления трещин при охлаждении после сварки. Интерметаллиды оказывают упрочняющее действие при внешнем механическом нарушении, поскольку способствуют перераспределению микронапряжений и накопленных микродеформаций в твердом растворе по объему СШ, снижая их максимальные значения [6]. Благодаря этому прочность соединения оказалась на уровне одного из соединяемых материалов – титанового сплава – и составила $\sigma_b = 474 - 515$ МПа.

Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в рамках выполнения государственного задания по теме АААА-А18-118020790145-0.

Список литературы

1. S. Katayama. Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing Limited, 2013. 667 p.
2. Shuhai Chen, Mingxin Zhang, Jihua Huang, Chengji Cui, Hua Zhang, Xingke Zhao. Microstructures and mechanical property of laser butt welding of titanium alloy to stainless steel // *Materials and Design* 53 (2014) 504-5011.
3. Черепанов А.Н., Оришич А.М., Пугачева Н.Б., Шапеев В.П. Исследование структуры и свойств неразъемных соединений титан-нержавеющая сталь, получаемых сваркой лазером с использованием промежуточных вставок и нанопорошков // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2015. – Т. 22. – № 2. – С. 143-150.
4. Оришич А.М., Черепанов А.Н., Шапеев В.П., Пугачева Н.Б. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов. – Новосибирск: из-во СО РАН, 2014. - 252 с.
5. Isaev V.I., Cherepanov A.N., Shapeev V.P. Numerical study of Heat Modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. –2016. – V. 99. – P. 711-720.
6. N. S. Michurov, N. B. Pugacheva, I. A. Veretennikova, Yu. V. Khalevitsky, E. O. Smirnova, and A. S. Igumnov. Contribution of intermetallics to the formation of the stress-strain state of tensile welds on the AISI 321 steel and the grade 2 titanium alloy with a copper insert // *AIP Conference Proceedings* 2053, 040058 (2018); doi: 10.1063/1.5084496.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВАРОЧНЫЕ ПУШКИ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ: ВАКУУМНОЕ И ВНЕВАКУУМНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Н.Г. РЕМНЕ

ТУСУР, г. Томск

E-mail: remnik77@gmail.com

В работе представлено описание оборудования на основе пушек с плазменным эмиттером для электронно-лучевой сварки. Приведены примеры применения пушек с низкой (до 50 кэВ) и высокой (до 120 кэВ) энергией электронов. Пушки с плазменным эмиттером эксплуатировались на автоматических поточных линиях герметизации тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) атомных станций. Оболочки ТВЭЛов изготовлены из сплавов циркония и алюминия. Интенсивный поток высокотемпературных паров циркония способен вызвать изменение эмиссионных свойств термокатода после сварки небольшого числа изделий. Пушки с плазменным эмиттером обеспечили более высокий ресурс, что позволило в целом увеличить производительность сварочного процесса.

Оборудование на основе пушки с плазменным эмиттером было использовано для заварки и дегазации заготовок для промышленного производства сверхпроводящих материалов обмоток соленоидов термоядерного реактора в рамках программы ИТЭР.

В работе рассматриваются характеристики проплавлений в нержавеющей стали и титане электронным пучком с энергией 120 кэВ при давлении в вакуумной камере 10^{-4} Торр. Проплавления получены при мощности электронного пучка 12 кВт для нержавеющей стали и 6 кВт для титана. Представлены шлифы проплавлений, которые имеют узкий и глубокий профиль проплавления с параллельными стенками, что характерно для электронного пучка с малым углом сходимости.

В качестве предварительного эксперимента выполнены сварки медных и алюминиевых образцов электронным пучком с энергией 120 кэВ, выведенным в область с атмосферным давлением. Сваривались алюминиевые и медные шинные выводы аккумуляторных батарей с пакетным набором электродов. Сварное соединение представляло собой две пластины толщиной 6 мм, между которыми расположены 80 фольг толщиной в среднем по 15 мкм каждая. Сварка одного такого соединения электронным пучком с энергией 120 кэВ и мощностью 4 кВт для медного вывода и 2 кэВ для алюминиевого осуществлялась за время порядка 30 секунд. Длина сварного шва порядка 280 мм.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ С ВОДЯНОЙ ЗАВЕСОЙ СОПЛА

Д.В. РОГОЗИН, М.А. СОЛОВЬЕВ, И.В. МАСЛОВ

Донской государственной технический университет, г. Ростов-на-Дону

E-mail: dmrogozin@yandex.ru

Интенсивное развитие добычи нефти и газа в шельфовой зоне морей и океанов обуславливает необходимость строительства морских буровых платформ. Их монтаж и ремонт связан с необходимостью сварки под водой. Подводная сварка осуществляется двумя основными способами: сварка в водной среде «мокрым» способом и сварка в специальной защитной камере в газовой среде «сухим» способом [Кононенко]. «Мокрый» способ сварки на глубинах до 20 метров экономически предпочтительней «сухого». Однако производительность и качество сварных соединений остаются низкими, а условия работы водолазов-сварщиков очень трудоемки. Гипербарическая сухая сварка способствует получению сварных швов, которые не уступают по качеству швам, выполненным на суше. Однако объем подготовительных работ перед процессом сварки значительно увеличивает сроки и стоимость выполнения работ. Все это приводит к необходимости разработки и совершенствования оборудования и технологии подводной сварки.

Одним из перспективных направлений развития подводной сварки является сварка с локальной защитой зоны сварки, когда создается безводная полость, окружающей зону сварки, а водолаз-сварщик находится вне зоны защиты. Системой локальной защиты могут быть как небольшие боксы, закрепленные на конструкции, так и подвижные колпаки с различными видами герметизации [Китай]. Использование локальной защиты намного дешевле, чем сварка «сухим» способом и не требует индивидуальной оснастки для различных конструкций.

В лабораторных условиях известен способ, где экранирование зоны сварки обеспечивается водяной завесой [Япония]. При механизированной сварке сплошной проволокой в защитном газе используется особой конструкции горелка с двойной защитой: водяной и газовой, что позволяет осуществлять сварку в газовой атмосфере за счет оттеснения воды из зоны сварки. Напор воды, подаваемый по отдельному каналу параллельно защитному газу, создает водяную завесу вокруг сопла, что способствует формированию локальной полости, внутрь которой подается защитный газ. Дуговой процесс протекает в среде защитного газа аналогично условиям на суше, но с более интенсивным охлаждением свариваемых деталей. Водяной занавес препятствует быстрому высвобождению защитного газа сразу из-под сопла горелки и попаданию окружающей воды в зону сварки. При этом необходимо создать условия надежной гидроструйной защиты от края сварочного сопла до поверхности свариваемых деталей, которая образует границу между окружающей водой и внутренней поверхностью защитного газа. В этом случае будут обеспечены условия надежной защиты зоны сварки и сварочной ванны от воздействия окружающей воды.

Целью работы является исследование гидродинамических характеристик процесса подводной дуговой сварки с водяной завесой сопла и определения факторов влияющих на формирование области локальной защиты для последующей оптимизации элементов геометрии горелки и повышения ее технологических характеристик.

Получение точных гидродинамических характеристик данного процесса осложнено неоднородностью сред, между которыми протекают потоки водяной завесы, разностью давлений в зоне локальной защиты и окружающей водной среды, а также воздействием на завесу потоков защитного газа. Численные эксперименты дают возможность моделировать условия течений, трудновоспроизводимых в натурном эксперименте, оценить вклад каждого физического явления по отдельности, отследить влияние изменений геометрии, граничных условий и свойств материалов. Численное интегрирование дифференциальных уравнений Навье–Стокса осуществляется методом конечных объемов. Расчетные области разбиваются (дискретизируются) на непересекающиеся объемы так, что каждая узловая точка содержится

в одном конечном объеме. Дифференциальное уравнение интегрируют по каждому конечному объему, при этом используются кусочно-непрерывные функции, описывающие поведение зависимой переменной между узлами. В результате получается дискретный аналог решаемого уравнения. В качестве замыкающего уравнения использовалась SST-модель турбулентности (Shear Stress Transport – модель переноса сдвиговых напряжений), предложенная Ментером, она хорошо описывает как свободные, так и пристеночные течения, что делает ее оптимальной для решения данной задачи. Сеточная модель расчетной области представляет собой трехмерную блочно-структурированную расчетную сетку. Расчеты произведены для следующих параметров: глубина – 0,3 м, объемная подача защитного газа – 150 л/мин, скорость потоков воды на выходе из сопла – 7, 8, 9 и 10 м/с. Расчет произведен в нестационарной постановке. В начальный момент времени весь объем расчетной области заполнен водой [4].

Анализ результатов численного моделирования показал, что основными геометрическими параметрами, влияющими на работу горелки с водяной завесой сопла, являются: форма сопел, их диаметры и толщина канала на выходе из водяного сопла, скорость подачи воды и газа, зазор между наконечником сопла и свариваемой деталью. При этом формирование безводной полости в зоне сварки обеспечивается разностью давлений в зоне локальной защиты и окружающей водной среды, а также скоростью потоков водяной завесы. Установлено, что с увеличением скорости водяной струи увеличивается давление в зоне локальной защиты. Это объясняется тем, что более мощная водяная струя обладает большей жесткостью и способна удерживать большее давление в замкнутой области. Высвобождение защитного газа происходит в области ослабления пристенной струи, образованной водяной завесой после разворота о поверхность свариваемой детали. При этом скорость потоков защитного газа должна обеспечивать разворот свободной струи только в сторону тупого угла. Недостаточная скорость подачи защитного газа способствует расслоению потоков водяной завесы в сторону острого угла, и попаданию воды в зону локальной защиты. Слишком низкая скорость водяной струи не обеспечивает надежного экранирования и также способствует попаданию воды в зону локальной защиты. Таким образом, при постоянной скорости подачи защитного газа безводная среда в области локальной защиты обеспечивается только в определенном диапазоне значений скорости потоков водяной завесы.

Разработанная модель нестационарного расчета позволяет с высокой степенью достоверности моделировать процесс формирования локальной защиты численным методом и была использована для оптимизации геометрии и режимов работы горелки с водяной завесой сопла, позволила определить время полного вытеснения воды из зоны сварки, скорости и направления потоков газа вблизи дуги и их давления на поверхность сварочной ванны, исследовать влияние углов подачи воды к свариваемым деталям и гидродинамических характеристик водяной завесы при различных конфигурациях выходного среза сопла.

Список литературы

1. Кононенко В.Я. Подводная сварка и резка. – Киев: Университет «Украина», 2011. – 284 с.
2. Yonghua Shi. Study on mini-cap local dry underwater flux-cored arc welding and online control of weld penetration / Yonghua Shi, Guorong Wang, Cuixia Liu // Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference Beijing, China, June 20-25, 2010, pp.246-250.
3. Ogawa Y. Mechanized underwater welding and cutting for VLFS // DOI: 10.1109/UT.2002.1002395 Conference: Underwater Technology, 2002. Proceedings of the 2002 International Symposium, 19 April 2002, pp.
4. Рогозин, Д.В. Численное моделирование формирования локальной защиты при подводной сварке с водяной завесой сопла / Д.В. Рогозин, И.В. Маслов // Сварка и диагностика. – 2018. – № 4. – С. 34-37.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СТРУКТУРИЗАЦИИ В АДГЕЗИОННОМ СЛОЕ В ПРОЦЕССЕ ЛАМИНИРОВАНИЯ

Э.Р. САЙФУЛЛИН, А.Г. КНЯЗЕВА

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
E-mail: elmir.saifullin@mail.ru

В настоящее время к быстро развивающимся методам создания трехмерных объектов относят процесс ламинирования (laminated object manufacturing – LOM), заключающийся в послойном соединении слоев материала. Данный метод позволяет создавать многослойные структуры с различным составом и свойствами слоев. Метод LOM взят за основу при производстве керамических деталей [1, 2], получении композита TiC/Ni из листов металла [3], соединении металлических фольг посредством диффузионной сварки [4], создании композитных металлических фольг [5]. Развитие метода LOM требует тщательного исследования и понимания процессов, происходящих в адгезионном слое. Химические и структурные превращения, обеспечивающие соединение слоев материала, играют в этих процессах важную роль. Эти исследования могут быть проведены только с применением численного моделирования.

Цель настоящей работы состоит в определении влияния кинетических параметров на процессы структуризации, происходящие в соединительном слое. Однако работ, преследующих подобную цель исследования, в литературе найдено не было. За основу были взяты результаты исследования [6, 7], поскольку процессы, происходящие при диффузионной и термитной сварке, имеют много общего с процессом соединения слоев в LOM. За основу была взята модель, описанная в работе [8], которая была усовершенствована за счет учета структурных превращений в адгезионном слое.

Исследуется термокинетическая модель для трехслойной системы, состоящей из соединяемых инертных слоев (А и В), между которыми расположен адгезионный слой (G). По поверхности верхнего слоя А с постоянной скоростью движется ролл, нагретый до температуры T_s .

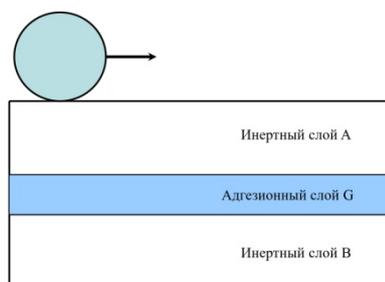


Рисунок 1 - Иллюстрация к постановке задачи

Математическая модель включает в себя уравнение теплопроводности для инертных слоев А и В:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

уравнение теплопроводности для адгезионного слоя G:

$$c_G \rho_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(1 + a \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) \right) \frac{\partial T_G}{\partial x} \right) + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(1 + a \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) \right) \frac{\partial T_G}{\partial y} \right), \quad (2)$$

и соотношение для степени структурных превращений:

$$\frac{da}{dt} = k_2(1 - a) - k_1 a \quad (3)$$

Здесь индекс i соответствует слою А или В, c_i – теплоемкость слоя, ρ_i – плотность слоя, λ_i – теплопроводность слоя, k_2 , k_1 – константы скорости прямой и обратной реакции структуризации в адгезионном слое. На границах раздела слоев полагаем справедливыми условия идеального контакта, на торцах принимаем условие адиабатичности. В плоскости движения ролла полагаем

$$y = H_B + H_G + H_A \quad T_A = T_S, \quad \text{если} \quad vt + x_0 - s(P) \leq x \leq vt + x_0 + s(P)$$

В других областях – условие адиабатичности.

Результаты численного исследования показывают, что в слое клея происходят структурные изменения, степень которых зависит как от кинетических, так и технологически параметров.

Список литературы

1. Prechtl M., Otto A., Geiger M. Rapid Tooling by Laminated Object Manufacturing of Metal Foil // *Advanced Materials Research*. – 2005. – V. 6–8. – P. 303-312.
2. Deckers J., Vleugels J., Kruth J.-P. Additive manufacturing of ceramics: a review // *J. Ceram. Sci. Technol.* – 2014. – No 5. – P. 245-260.
3. Zocca A., Colombo P., Gomes C.M., Gunster J. Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2015. – V. 98. – P. 1983-1990.
4. Zhan Y., Han J., Zhang X., He X., Li Z., Du S. Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2001. – V. 299. – P. 218-224.
5. Butt J., Mebrahtu H., Shirvani H. // A novel rapid prototyping process for the production of metal parts: Proceedings of the Second International Conference on Advances in Civil. – Structural and Mechanical Engineering-CSM. – Birmingham, 2014. – P. 26-29.
6. Chashchina A.A., Knyazeva A.G. Numerical Study of the Problem of Thermal Ignition in a Thick-Walled Container // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2004. – V. 40. – No. 4. – P. 432-437.
7. Aligozhina K.A., Knyazeva A.G., Modeling the Solid Phase Reaction Distribution in the Case of Conjugate Heat Exchange // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2017. – V. 53. – No. 4. – P. 411–419.
8. Knyazeva A.G. Model of chemical conversion initiation in the adhesive bonding layer during roll motion in the process of laminated object creation // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. – 2018. – V. 9. – P.77-89.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЭЛЕКТРОДАМИ Т-590 И ЭН-60М НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ СТАЛИ 09Г2С. СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ПОКРЫТИЯ ПРИ НАПЛАВКЕ НА РЕЖИМЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА

Ю.Н. САРАЕВ, В.П. БЕЗБОРОДОВ, М.В. ПЕРОВСКАЯ, В.М. СЕМЕНЧУК

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: val@ispms.tsc.ru

Наплавка является экономичным и широко применяемым в промышленности методом восстановления деталей машин и механизмов, придания их рабочей поверхности износостойкости. Наиболее распространённые износостойкие наплавочные материалы включают сплавы с хромом, вольфрамом, бором, молибденом и т.д. Такие материалы: Fe-C-Cr; Fe-C-Mn; Fe-C-W; Fe-C-Cr-Mn; Fe-C-Cr-B; Fe-C-Cr-Ni; Fe-C-Mo; Fe-C-Cr-Mo; Fe-C-Cr-W; Fe-C-Cr-W-V; Fe-C-Cr-W-B и т.д. Для защиты от абразивного износа широко применяются сплавы с высоким содержанием карбидной фазы. Износостойкость этих наплавочных материалов сильно зависит от типа и количества карбидной фазы в сплавах. Чаще всего, упрочняющие фазы в таких наплавочных сплавах содержат карбиды, бориды и нитриды Fe, Cr, W, V, Ti, Mn, Mo и т.д., а также карбобориды и карбонитриды этих элементов. Процесс наплавки из-за различий величин вложений тепла и свойств электродных материалов оказывает специфическое влияние на свойства покрытий.

Свойства наплавленного металла снижаются из-за различных дефектов, которые возникают в процессе наплавки вследствие отклонений и действия остаточных и эксплуатационных напряжений. Эти факторы часто приводят к ускорению разрушению покрытий.

Современные способы наплавки позволяют регламентировать скорость охлаждения материала покрытий и управлять процессами их плавления и кристаллизации, формированием структуры и физико-механическими свойствами.

Важной задачей является исследование влияния технологических режимов наплавки на механические и эксплуатационные характеристики покрытий применением новых присадочных материалов, модифицирующей расплав, и импульсных процессов снижающих вложения тепла и структурную неоднородность металла.

В настоящее время уже почти исчерпаны все возможности увеличения прочности и износостойкости наплавленного металла. Дополнительные возможности появляются при создании новых композиционных порошков. Это позволяет получать композиции без существенных ограничений по составу и числу компонентов.

Целью данной работы являлось: Повышение свойств наплавленных покрытий применением импульсно-дуговых методов наплавки при модифицировании расплавляемого металла композиционными порошковыми материалами с микрокристаллической структурой.

Были проведены исследования наплавленных слоев, полученных наплавкой электродами Т590 на постоянном токе и на импульсном режиме. В работе были исследованы образцы из стали 09Г2С. Наплавка осуществлялась источником питания ФЕБ-315 «МАГМА» с пультом «Пульс» для реализации импульсно-дугового процесса с модуляцией тока - на частотах 1-5 Гц. Смесь гранул порошков со связующим жидким стеклом наносили тонким слоем на покрытия электродов.

Изменение параметров процесса наплавки влияет на уровень легирования наплавленного металла.

В качестве модифицирующей смеси использовались порошковые модификаторы на основе дисперсных частиц карбидов, боридов и нитридов. Варьирование составов электродного материала позволяет изменять состав наплавленного металла, обладающего различными свойствами после наплавки. При наплавке на постоянном токе формируется крупнодендритная структура наплавленного металла покрытия, а при использовании импульсного режима - мелкодендритная структура.

Материал наплавленного покрытия имеет твердость 270-300 HV, ЗТВ 210-230 HV. При постоянном токе температура нагрева выше, что вызывает больший рост зерна. Температура

в зоне действия источника тепла в процессе наплавки может превышать температуру плавления тугоплавких соединений. Это приводит к их растворению в расплаве ванны. При наплавке на постоянном токе зона с укрупненным размером зерна шире, чем при модуляции тока, что свидетельствует о более высоких вложениях тепла и длительности термическом воздействии горячей дуги.

Измельчение зерна является одним из способов повышения прочности покрытий. Металлографические исследования наплавленных покрытий выявили измельчение структурных составляющих материала после импульсной технологии в $\sim 1,5$ раза. Это объясняется особенностями импульсного режима наплавки с интенсивным перемешиванием расплава и образованием центров кристаллизации. При изменении режима наплавки меняются процесс расплавления материала и химическая однородность наплавленного слоя. На свойства покрытий оказывает влияние содержание сохранность упрочняющих фаз, размеры и их расположение в матричном материале.

Таким образом, использование технологии импульсно-дуговой наплавки позволяет через программируемый ввод тепла в зону покрытия управлять процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла и измельчать структуру металла покрытия и повышать его свойства. Покрытие, наплавленное на импульсном режиме, имеет более однородную структуру. Опробовано восстановление геометрических размеров изношенных изделий с применением импульсно-дуговой наплавки электродами Т590 и последующее упрочнение поверхностного слоя восстановленных изделий наплавочными материалами с высокими физико-механическими свойствами.

Работа выполнена в соответствии с программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, проект III.23.2.1.

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Ю.Н. САРАЕВ¹, С.В. ГЛАДКОВСКИЙ², М.В. ПЕРОВСКАЯ¹, В.М. СЕМЕНЧУК¹, А.С. НЕПОМНЯЩИЙ¹

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск,

² Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

E-mail: litsin@ispms.tsc, gsv@imach.uran.ru

Повышение надежности изделий и элементов конструкций, эксплуатирующихся при низких климатических температурах в условиях Арктики и Крайнего Севера в значительной степени определяются качеством сварных соединений и уровнем их механических свойств. Существенное улучшение механических характеристик сварных соединений из низкоуглеродистых сталей может быть достигнуто за счет использования метода импульсно-дуговой сварки, обеспечивающего регулируемое тепловложение и интенсивное перемешивание сварочной ванны на этапах плавления и кристаллизации металла шва из расплава [1].

Проведенные методами дюротрии, металлографии и рентгеновского анализа исследования показали, что импульсно-дуговая сварка с низкочастотной модуляцией тока по сравнению со сваркой на постоянном токе позволяет получить наиболее однородное распределение значений микротвердости по ширине всех зон сварного соединения стали 09Г2С и примерно в 1,5-2 раза повышает дисперсность структурных элементов металла ЗТВ. Дополнительная ультразвуковая ударно-механическая обработка поверхности сварных соединений из низкоуглеродистой стали, полученных сваркой с модуляцией тока, приводит к формированию в металле ЗТВ остаточных напряжений сжатия, которые задерживают образование и распространение усталостных трещин, увеличивают количество циклов нагружения до появления макротрещины, а также способствуют повышению комплекса механических свойств сварного соединения при растяжении.

Показано, что адаптивная импульсно-дуговая сварка с низкочастотной модуляцией тока (СМТ) по сравнению со сваркой на постоянном токе (СПТ), позволяет получить более высокие значения характеристик ударной вязкости и динамической трещиностойкости металла ЗТВ в интервале температур от +20 до -60 °С. При этом ударная вязкость металла шва и ЗТВ сварных соединений, полученных методом СМТ, во всем изученном температурном диапазоне испытаний сопоставима со значениями ударной вязкости основного металла или превышает их уровень. Для образцов сварных соединений, полученных ручной дуговой сваркой, наблюдается повышение низкотемпературной (-60 °С) статической трещиностойкости при смене технологии сварки от СПТ к СМТ. Так, например, более высокий уровень значений $K_{Ic} = 91,0-94,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, достигается при испытании образцов, сваренных с применением технологии СМТ.

Работа выполнена за счет средств РНФ, проект № 16-19-10010-П.

Список литературы

1. Сараев Ю.Н., Гладковский С.В. и др. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Глава 5 в книге: Наукоемкие технологии в проектах РНФ. Сибирь / Под редакцией С.Г. Псахье и Ю.П. Шаркеева. – Томск: Издательство НТЛ, 2017. – 428 с. ISBN 978-5-89503-607-5. С. 134-202.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА

Ю.Н. САРАЕВ, А.Г. ЛУНЕВ, В.М. СЕМЕНЧУК, А.С. НЕПОМНЯЩИЙ

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

Аннотация

В работе рассмотрены основные направления совершенствования традиционных методов дуговой, плазменной и электрошлаковой сварки и наплавки, основанных на применении алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима. Показано, что адаптивные импульсные технологии обладают рядом бесспорных преимуществ перед традиционными, реализующими жестко задаваемую программу изменения основных энергетических параметров режима. В работе обосновываются основные принципы функционирования адаптивных технологий, обеспечивающих стабильность тепломассопереноса и получения неразъемных соединений требуемого качества, даже в условиях различного рода возмущений, действующих на систему: источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие.

Введение

Эксплуатационная надежность высокоответственных сварных конструкций непосредственно связана со стабильностью энергетических параметров технологических процессов их получения. Вместе с тем, наличие большого количества возмущающих факторов (повышенные и меняющиеся зазоры, изменяющееся пространственное положение сварочной ванны, ступенчатое изменение вылета электрода и др.) существенно затрудняют формирование бездефектных сварных соединений. Одним из путей снижения зависимости стабильности технологических процессов от возмущающих факторов является применение импульсных технологий [1]. Однако данное направление не всегда дает желаемый результат, поскольку в процессе сварки не ведется активный контроль возмущающих воздействий в сложной электродинамической системе источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие [2].

Более широкие возможности в обеспечении качественных и эксплуатационных показателей высокоответственных сварных соединений представляют адаптивные импульсные технологии сварки и наплавки [3]. Суть данного подхода заключается в адаптивном контроле изменения энергетических параметров технологического процесса по их мгновенным значениям: тока дуги, напряжения, энергии, затраченной на плавление и перенос каждой капли электродного металла. Благодаря наличию обратных связей в такой электродинамической системе обеспечивается полный контроль стабильности тепловых и энергетических параметров процесса, а также характеристик массопереноса электродного металла, которые обеспечивают получение требуемых эксплуатационных показателей [4].

Необходимость учета вышеприведенной специфики формирования неразъемных соединений требует проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса электродного металла (на интервалах плавления, переноса и кристаллизации металла шва из расплава), опровергающих формирование сварных соединений и наплавленных покрытий методами сварки и наплавки. Дальнейшее развитие представленного направления междисциплинарных научных исследований является **актуальной задачей фундаментальных ориентированных исследований**, результатом которых должно стать формулирование концептуальных основ повышения ресурса и живучести изделий технических систем, путем установления корреляции между характеристиками тепломассопереноса капель электродного металла, теплосодержанием сварочной ванны и структурой, физико-механическими и эксплуатационными свойствами неразъемных соединений материалов [5].

Цель проводимых исследований – повышение ресурса, живучести и эксплуатационной надежности изделий технических систем со сварными соединениями и

наплавленными покрытиями посредством управления быстропротекающими процессами тепломассопереноса путем применения алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима.

Практическое достижение сформулированной цели связана с необходимостью решения ряда сложных технологических и электротехнических задач. Для решения первой группы задач – управления каплеобразованием, переносом электродного металла, кристаллизацией сварочной ванны – в сварочное оборудование вводят каналы обратных связей, по которым обеспечивается контроль изменения основных показателей процесса – напряжения дуги, сварочного тока, мгновенной мощности сварочной дуги. Для решения второй группы задач (электротехнических), необходимо использование в комплекте сварочного оборудования специальных сильноточных импульсных коммутаторов сварочного тока, как правило, малоинерционных, с удовлетворительными массогабаритными показателями и надежных в работе.

Основной задачей при выполнении исследований по влиянию тепломассопереноса при дуговой сварке, является обоснование условий, при которых происходит формирование неразъемного соединения. Нагрев и охлаждение обрабатываемого изделия вызывают разнообразные физические и химические процессы в самом материале: плавление, перенос электродного металла, кристаллизация расплава, напряжения и деформации, возникающие в зоне неразъемного соединения, определяющие эксплуатационные показатели всего изделия.

Заключение.

Методы АРТ, благодаря стабильности энергетических параметров режимов при сварке в различных пространственных положениях, обеспечению возможности программируемого ввода тепла в зону сварного соединения, управления процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла, формирования мелкодисперсной структуры металла шва и зоны термического влияния, способствуют уменьшению степени остаточных деформаций сварных соединений, что существенно повышает их эксплуатационные показатели.

Работа выполнена за счет средств проекта РНФ №16-19-10010-П.

Список литературы

1. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 14-19.
2. Сараев Ю.Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Сварочное производство. – 2002. – № 1. – С. 4-11.
3. Опыт разработки и практического применения адаптивных импульсно-дуговых методов сварки для строительства и ремонта магистральных трубопроводов // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1. – С. 210-219.
4. Ларионов В.П., Слепцов О.Е., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условия Сибири и Крайнего Севера // Вестник Академии Военных Наук. – 2008. – № 3. – С. 67-69.
5. Сараев Ю.Н. Повышение надежности металлических конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур посредством комплексного применения современных методов модифицирования зоны сварного соединения / Ю.Н. Сараев, В.П. Безбородов, С.В. Гладковский, Н.И. Голиков // Сварочное производство. – 2016. – № 9. – С. 3-9.

**LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY FOR IN-SITU ONLINE
MULTIELEMENTAL ANALYSIS OF WEAR RESISTANT COATINGS DURING ITS
TREATMENT BY COAXIAL LASER CLADDING**

P.A. SDVIZHENSKI^{1,2}, V.N. LEDNEV^{1,2}, R.S. TRETYAKOV³, M.Ya. GRISHIN^{1,4}, R.D. ASYUTIN³, S.M. PERSHIN¹

¹ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Science, Moscow

² National University of Science and Technology MISiS, Moscow

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Moscow Region

E-mail: pausdw@gmail.com

A feasibility of real-time quantitative multielemental analysis during parts growth by additive manufacturing technology (coaxial laser cladding) has been demonstrating for the first time using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). A low weight and compact LIBS probe was developed to equip the laser cladding head installed at six axis industrial robot. LIBS quantitative analysis of key components (carbon and tungsten) has been demonstrated in real-time conditions during synthesis of high wear resistant coatings of nickel alloy reinforced with tungsten carbide particles. Hot solidified clad as well as a melt pool surface was sampled by LIBS probe but better analytical results were achieved for the latter case due to low partial sinking of heavy tungsten carbide particles in nickel matrix. LIBS system was calibrated for quantitative measurements by offline analysis with energy dispersive X-ray spectrometry (EDX). LIBS system was capable to quantify concentrations for both light (carbon, silicon) and heavy (nickel, tungsten, chromium, etc.) elements at frequency of 10 Hz. A good correspondence was achieved between online LIBS measurements and offline analysis opens wide perspectives for LIBS technique as a powerful tool for controlling process of parts growth by additive manufacturing. Also, LIBS technique demonstrated a feasibility of failures detection in real time: poor laser beam quality, undesirable variation of components concentrations. Both failures can be identified by LIBS thus production process can be stopped until failure will be recovered.

ВЛИЯНИЕ ВИДА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ МОСТОВ

Б.С. СЕМУХИН

Томский архитектурно-строительный университет, г. Томск
bsemukhin@mail.ru

Автомобильные мостовые металлические переходы занимают значительное место среди всех типов мостов. Этому способствует все увеличивающаяся сеть автодорог, а неразрезное металлическое строение позволяет уменьшать сроки строительства. Такой тип мостов достаточно просто проектируется в связи с небольшим количеством неразъемных сварных соединений, а сами мосты в процессе строительства и эксплуатации поддаются аттестации, как в статическом, так и в динамическом состоянии. Мостовые конструкции пролетных строений внеклассных мостов работают в сложных условиях. При эксплуатации мосты испытывают динамические нагрузки от подвижного состава и находятся под влиянием разнообразных внешних воздействий – ветровых нагрузок, атмосферной влаги, перепадов температур от -50 до $+30$ °С. Поэтому к состоянию и прочности стыковых сварных соединений предъявляются жесткие требования, определяемые ГОСТ.

Проблемы динамики и прочности мостовых конструкций часто решаются на основе определения статических и динамических номинальных и локальных напряжений от эксплуатационных нагрузок. Одной из важнейших задач при решении проблем обеспечения прочности, ресурса и безопасности современных мостов всегда являлось определение напряженно-деформированных состояний (НДС) несущих элементов конструкций при эксплуатации. Серьезной проблемой при оценке напряженно-деформированного состояния несущих конструкций являются остаточные и действующие напряжения в них, возникающие, вследствие сварки.

В нашей работе проведены модельные эксперименты по определению НДС в зависимости от типа сварного соединения. В качестве объектов были выбраны широко используемые в мостостроительстве стали 15ХСНД и 09Г2С. Нагружение проводили на испытательной машине Instron 3382. Образцы представляли сваренные встык и в тавр полосы. Испытания осуществляли по методу 4точечного нагружения ГОСТ 14019-80.

В результате таких измерений построены объемные (3d) изображения распределения напряжений вблизи и вдали от сварочного шва в процессе нагружения (*in situ*). В исходном ненагруженном состоянии образцы стали со сварным стыковым швом имеют по обе стороны от шва симметричный характер упруго напряженного состояния, что может свидетельствовать о хорошем качестве сварки. Дальнейшие испытания меняют картину распределения. При нагружении до напряжений 100Мпа происходит выравнивание действующих напряжений вблизи и вдали от корня шва. Их величина становится менее 75 Мпа. Такое распределение может говорить о значительном вкладе на этом участке упругих сжимающих напряжений и как следствие уменьшения суммарного вклада в картину распределения. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит увеличение напряжений, хотя характер и форма распределения остаются прежними. Это свидетельствует в пользу того, что при больших и малых нагрузках шов работает одинаково и не происходит резкого увеличения, а напротив происходит опять выравнивание поверхности напряжений.

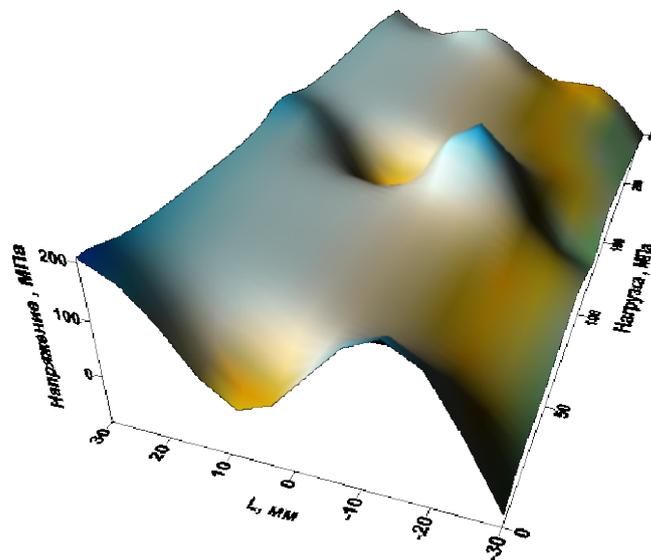
В результате следует ожидать при сравнении с эпюрой напряжений в реально эксплуатируемом мосте таково же поведения конструкции со стыковыми швами данного типа.

Таким образом, промоделировав в лабораторных условиях работу неразъемных соединений перешли к анализу изменений напряжений в балке главного пролет коммунального моста через р. Томь в г. Томске.

Измерения проводили в разных точках по вертикали главной балки. В каждой точке измерения проводили при разных грузовых потоках с целью установления реально возникающих напряжений. При разных грузовых потоках наблюдается резкое изменение-увеличение или уменьшения напряжений в разных точках главной балки. Такие изменения

однозначно говорят о том, что в этих местах присутствует сильный концентратор напряжений- сварной шов. В главной балке в середине есть горизонтальные ребра жесткости и продольный сварной шов. Если проанализировать изменение напряжений вблизи этих швов станет ясно, что в процессе изменения нагрузки, то есть в динамике работы моста есть моменты когда напряжения возникающие вблизи шва растут как это и продемонстрировано в модельных условиях где показана работа неразъемных соединений. Величины напряжений с течением времени эксплуатации могут, как увеличиваться, так и уменьшатся. Поэтому систематический мониторинг состояния стали в ранее измеренных точках позволит заранее предпринимать меры по улучшению. Такую задачу решит сравнение с модельными эпюрами, полученными ранее в лабораторных условиях. А сравнение эпюр на реальном мосте позволит определять динамические характеристики.

В заключение можно сделать вывод о том, что тип неразъемных соединений, широко используемых при строительстве стальных мостов на автодорогах, влияет на перераспределение напряжений в основных конструкциях мостов, что может приводить к деформации и разрушению долгие годы работающих элементов моста.



Изменение напряжений вблизи сварного шва стыкового соединения при разной нагрузке

ВОЗДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦЕВОМ СТЫКЕ РАЗНОТОЛЩИННЫХ ТРУБ

М.М. СИДОРОВ, Н.И. ГОЛИКОВ

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск
E-mail: sidorovmm@bk.ru

В сварных соединениях, как правило, имеются растягивающие остаточные напряжения, которые негативно влияют на их усталостную прочность [1, 2]. Их негативное влияние не всегда удается минимизировать с помощью до сварочных, а также выполняемых в процессе сварки мероприятий. Поэтому во многих случаях прибегают к методам обработки после сварки. В ряде случаев обработка соединений с целью снижения уровня растягивающих остаточных напряжений является технологической необходимостью. Для этого применяют различные способы и устройства [3-6]. Среди них одним из эффективных и доступных методов обработки после сварки является ультразвуковая ударная обработка.

Принцип действия ультразвуковой ударной обработки (УУО) основан на воздействии низкочастотным ультразвуковым колебанием виброударного инструмента на поверхность сварного соединения. В результате на обработанной поверхности происходит перераспределение опасных растягивающих остаточных напряжений на сжимающие [7-9]. А как известно, сжимающие остаточные напряжения благоприятно действуют на усталостную прочность сварного соединения.

Изучение перераспределения остаточных напряжений в сварных соединениях до и после обработки достаточно трудоемкий процесс. Не всегда точно можно знать, как могут образоваться поля остаточных напряжений после воздействия обработки. Это во многом зависит от геометрических размеров соединения, напряженного состояния, мощности, длительности и способа обработки. Поэтому проведение исследований в этом направлении является актуальной научно-технической задачей. Это может помочь правильно применить перспективные технологии обработки в практике и продлить срок эксплуатации ответственных сварных конструкций.

Цель работы — исследование влияния повторной УУО на перераспределение остаточных напряжений в кольцевом стыке разнотолщинных труб.

Определение остаточных напряжений проведено рентгеновским методом, основанного на измерении микродеформаций кристаллической решетки материала, вызванных их действием. Результаты исследований показали, что растягивающие остаточные напряжения в кольцевом стыке после сварки образуются во внутренней поверхности трубы. Ультразвуковая ударная обработка кольцевого стыка с внутренней стороны приводит к полному преобразованию остаточных напряжений с растягивающих на сжимающие. Установлено, что ультразвуковая ударная обработка кольцевого стыка разнотолщинных труб со скоростью 0,04 м/мин может привести к обратному эффекту, т.е. к снижению уровня наведенных сжимающих напряжений.

Список литературы

1. Hensela J., Nitschke-Pagela T., Tchoffo Ngoula D., Beier H-Th, Tchuindjang D., Zerbstd U. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 198. – P 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.10.024>.
2. Shena F., Zhaoa B., Lib L., Chuaa Ch. K., Zhou K. Fatigue damage evolution and lifetime prediction of welded joints with the consideration of residual stresses and porosity // Fatigue. – 2017. – Vol. 103. –P. 272-279. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.014>.
3. Du Ch., Wang X., Luo Ch. Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the 2205DSS/Q235 laser beam welding joint // Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – Vol. 263. – P. 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.013>.

4. Wei X.L., Ling X. Redistribution of Residual Stress Field in the Weld Joint Due to Laser Shock Processing // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 130. – P. 948-955. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.247>.
5. Khajeiana A., Mahmoudi A.H., Mehmanparast A. Shot peening effects on residual stresses redistribution of offshore wind monopile multi-pass weldments // *Marine Structures* – 2019. – Vol. 66. – P.106-120. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.03.006>.
6. Chaobo G., Zhijiang W., Dongpo W., Shengsun H. Numerical analysis of the residual stress in ultrasonic impact treatment process with single-impact and two-impact models // *Applied Surface Science* – 2015. Vol. 347. – P. 596-601. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.128>
7. Ganiev I., Gafurov I., Vagapov I. Ultrasonic treatment by an intermediate striker: Tool dynamics and material improvement // *Applied Acoustic*. – 2016. – Vol. 103. – P.195-201. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.015>.
8. Statnikov E.S., Korolkov O.V., Vityazev V.N. Physics and mechanism of ultrasonic impact // *Ultrasonics*. – 2006. – Vol. 44. – P. e533-e538. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.119>.
9. Golikov N.I., Sidorov M.M. Investigation of the redistribution of residual stresses in cyclic loading of welded joints// *Welding International*. – 2014. – T. 28. – №2. – C. 970-972.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУР

В.А. СКРИПНЯК

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

E-mail: skrp2006@yandex.ru

Обеспечение прочности сварных соединений металлических конструкций из новых сплавов и сталей в условиях экстремальных внешних воздействий является актуальной задачей для судостроения, аэрокосмической и автомобильной отраслей промышленности. В связи с освоением Арктики возросли требования к надежности сварных соединений и технологиям сварки для их создания. Одной из технологий, позволяющей получать прочные и надежные соединения является сварка трением с перемешиванием.

В данной работе для прогнозирования механического поведения сварного соединения в зависимости от сформированной микроструктуры предлагается использовать многоуровневое компьютерное моделирование. В рамках многоуровневого подхода предложена модель, учитывающая структуру в зоне сварных соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием.

В модели учитываются состав, характерная микроструктура сплавов с ОЦК и ГПУ решетками, а также данные о зеренной структуре, геометрии полосовой структуры в зоне перемешивания, размерах и распределении дисперсных частиц упрочняющих фаз, данные о размерах объемных дефектов (пустот).

Для описания пластического течения сплавов на микроскопическом уровне использовалась микродинамическая модель с дислокационной кинетикой и кинетикой двойникования.

Модель применялась для исследования закономерностей деформации и разрушения сварного соединения пластин при растяжении.

Представлены полученные с применением модели результаты численного моделирования механического поведения сварных элементов конструкций из сплавов магния, бета титана в диапазоне скоростей деформации от 0.1 до 1000 1/с и температурах от 210 К до 520 К.

Результаты моделирования показали, что конфигурация сварного шва пластин из магниевого сплава МА2 и полосовая структура в зоне перемешивания слабо влияет на свойства соединения при растяжении в рассмотренном диапазоне скоростей деформации.

Многомодальное распределение зерен по размерам в зоне шва обуславливает возрастание сопротивления пластическому течению и запаздывание развития повреждений. В результате сопротивление пластическому деформированию сварного соединения превышает предел текучести материала в исходном состоянии.

Показано, что предельные деформации до разрушения сварного соединения рассмотренных материалов при растяжении снижается пропорционально температуре нагружения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ТОЛЩИНОЙ 60 ММ

А.П. СЛИВА, А.Л. ГОНЧАРОВ, Е.В. ТЕРЕНТЬЕВ, И.А. ХАРИТОНОВ, В.К. ДРАГУНОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
E-mail: slivap@mail.ru

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) разнородных материалов существенное влияние на качество получаемых сварных соединений оказывают термоэлектрические явления, заключающиеся в возникновении термоэдс и термоэлектрических токов в стыке соединяемых деталей. Отклонение пучка, вызываемое магнитным полем термоэлектрических токов, может стать причиной образования дефектов типа непроваров в корне шва и, как следствие, к браку.

Получение точных численных моделей ЭЛС разнородных материалов, связывающих режимы и геометрию свариваемых изделий с отклонением электронного пучка, затруднено, так как при ЭЛС разнородных материалов возникают взаимовлияющие факторы: тепловое поле от канала проплавления обуславливает генерацию термоэлектрических токов, генерирующих магнитное поле, зависящее, в том числе, и от магнитных свойств материалов. Магнитное поле воздействует на электронный пучок, что приводит к его отклонению, изменению канала проплавления, теплового поля, растекания термоэлектрических токов и распределения магнитного поля.

В связи со сложностью разрабатываемых численных моделей, их верификация должна производиться по нескольким параметрам. Построение распределения тепловых полей от воздействующего теплового источника - часто возникающая задача, которая достаточно хорошо подвергается расчету, в том числе численными методами. Вместе с тем, генерация токов от термоэдс и возникающее при этом магнитное поле, а тем более вызываемое магнитным полем изменение траектории электронного луча – комплекс взаимосвязанных процессов, которые в такой постановке возникают только при электронно-лучевой сварке и мало изучены.

Цель работы – разработка методик экспериментальной верификации численных моделей отклонения электронного луча при ЭЛС разнородных материалов и исследование влияния магнитного поля термоэлектрических токов на формирование сварных соединений разнородных сталей толщиной 60 мм.

Для повышения эффективности верификации разрабатываемых численных моделей, наиболее перспективным и реализуемым представляется верификация траектории электронного пучка не только по макрошлифам сварных соединений разнородных материалов, но также и по величине индукции магнитного поля. Для этого разработана методика эксперимента по измерению индукции магнитного поля в контрольных точках над свариваемыми образцами. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд для измерения индукции магнитного поля на основе многоканального комплекса автоматизации измерений АСTestPro. Изготовлены датчики Холла на основе линейного преобразователя магнитного поля AD22151 (AnalogDevices) с диапазоном измерения ± 2.5 , ± 6 и $\pm 13,45$ мТл. Проведена калибровка и настройка датчиков для работы совместно с комплексом автоматизации измерений АСTest.

Исследования проводились для трех пар сталей: 12Х18Н10Т+20Х13, 12Х18Н10Т+09Г2С и 09Г2С+20Х13. В результате получены распределения индукции магнитного поля в процессе ЭЛС над свариваемыми образцами и величины отклонения электронного луча в корне шва.

Полученные результаты были использованы для верификации численных моделей расчета индукции магнитного поля и величины отклонения электронного луча при ЭЛС разнородных сталей.

Значения индукции магнитного поля в численной и физической модели показывают хорошую корреляцию. При моделировании ЭЛС сталей 12Х18Н10Т и 20Х13, где

наблюдается существенно большее отклонение, величина магнитного поля также увеличивается по сравнению с парой 09Г2С и 20Х13, что говорит об адекватной реакции численной модели на увеличение термоэДС свариваемой пары материалов.

Сравнение расчетных и экспериментальных траекторий электронного пучка, полученных из анализа по макрошлифам сварных соединений, показало, что в целом расчетная модель траектории адекватно отражает процесс отклонения пучка: в обоих случаях отклонение происходило на материал с более положительным потенциалом интегральной термоэДС. Величина расхождения расчетного и экспериментального отклонения пучка в корне шва для 5-ти проведенных экспериментов составляла не более 10%.

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СПЛАВА Zr-1%Nb

М.С. СЛОБОДЯН, А.С. КИСЕЛЕВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: mss@tpu.ru

Целью настоящей работы являлось исследование влияния энергетических параметров режима импульсной лазерной сварки при формировании модельных стыковых соединений листовых деталей из сплава Э110 (Zr-1%Nb) толщиной 0,5 мм.

В результате проведенных исследований получены данные о влиянии энергии импульсов, их длительности и частоты следования, а также скорости сварки на геометрические размеры сварных швов и прочностные свойства соединений, химический состав, структуру и микротвердость металла, скорость сорбции водорода. Кроме того, оценена стойкость сварных соединений против коррозии и высокотемпературного окисления, а также возможность улучшения их эксплуатационных свойств путем модифицирования поверхности импульсным ионным пучком. Кроме того, выполнено численное моделирование процесса с использованием трехмерной модели течения и теплообмена в сварочной ванне, которая также учитывает конвекцию Бенара–Марангони, что позволило изучить влияние параметров режима на динамику изменения температурных полей в свариваемых деталях.

Сделаны выводы о том, что отсутствие темных цветов побежалости на поверхности сварных соединений циркониевых сплавов при визуальном осмотре не позволяет в должной степени гарантировать чистоту металла и, как следствие, требуемые эксплуатационные свойства соединений. Импульсная лазерная сварка циркониевых сплавов в отапливаемых цехах позволяет получать сварные швы с содержанием водорода в пределах, обозначенных стандартами, при использовании в качестве защиты ламинарных потоков аргона для технических целей чистотой >99.993%. Однако их смешивание с атмосферными газами приводит к загрязнению металла сварного шва углеродом, кислородом и азотом. Как следствие, формируются поверхностные включения сложного химического состава и кристаллизационные микротрещины. Они, в свою очередь, являются концентраторами напряжений, по которым происходит разрушение сварного шва. Кроме того, их наличие увеличивает скорость поглощения водорода и снижает коррозионную стойкость сварных соединений.

Модифицирование поверхности на импульсном ионном ускорителе не привело к заметному изменению ее коррозионной стойкости. Однако, автоклавные коррозионные испытания в условиях, имитирующих работу ядерных реакторов в течение 200 часов привело к полной релаксации модифицированного слоя, а также снижению разброса значений микротвердости и, соответственно, остаточных напряжений в сварных швах. После высокотемпературного (1200 °С) окисления в паре в течение 60 с поверхности образцов без облучения покрыты светло-серой окисной пленкой с блистерами, предварительно облученных – образцов черного цвета с небольшим количеством светлых нодулей. Заводские дефекты поверхности, выцарапанные номера образцов и микротрещины на сварных швах не явились концентраторами формирования нодулей. Существенные различия структуры основного металла и сварных швов, а также предварительно облученных и не облученных образцов отсутствуют. Толщина оксидного слоя и слоя α -Zr(O) неравномерна. В целом толщина оксидного слоя на облученных образцах и их привес больше, чем необлученных. Сделан предварительный вывод об отсутствии эффективности исследованной технологии ионного модифицирования поверхности с целью повышения стойкости циркониевых сплавов против коррозии и высокотемпературного окисления в паре.

При дальнейшей оптимизации технологии импульсной лазерной сварки циркониевых сплавов необходимы дополнительные исследования по определению оптимальных значений коэффициента перекрытия. Также, актуальными направлениями следует считать оценку влияния на свойства сварных соединений состава защитного газа (Ar, He или их смесь),

скорости потока, его стабильности/пульсации, угла наклона, конфигурации и расстояния сопел от сварочной ванны с целью минимизации загрязнения металла атмосферными газами.

ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ НИЖЕ НОРМАТИВНЫХ

Н.П. СТАРОСТИН, О.А. АММОСОВА

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

E-mail: ammosova_o@mail.ru

Полиэтиленовые трубы широко применяются при строительстве распределительных систем газоснабжения и в других хозяйственных объектах, что обусловлено основными преимуществами этих труб (прочность, гибкость и химическая инертность) в сравнении со стальными. Одним из основных факторов, препятствующих широкому применению полиэтиленовых труб в регионах холодного климата, является отсутствие надежной технологии сварки при низких температурах окружающего воздуха (ОВ). Осуществление оперативного ремонта газопроводов из полиэтиленовых труб в зимний период в территориях холодного климата становится особенно актуальной задачей с учетом увеличения их протяженности. Температура окружающего воздуха (ОВ) выше минус 15 °С составляет рекомендуемую температуру для проведения сварочных работ при ремонте и монтаже газораспределительных сетей из полиэтиленовых труб. В случае пониженных температур воздуха сварочные работы рекомендуется проводить в легких отапливаемых помещениях, в которых поддерживается температура выше минус 15 °С. Проведение таких работ обусловлено значительными непроизводственными затратами и длительной подготовкой, что непозволительно в аварийных ситуациях.

При сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур в процессе оплавления свариваемых поверхностей периферийные области сварного соединения прогреваются незначительно вследствие низкой теплопроводности полимерного материала. Кроме того при низкой температуре ОВ увеличивается конвективный теплообмен со свободных поверхностей соединения. Эти два фактора способствует повышению скорости охлаждения в зоне термического влияния (ЗТВ) на стадии охлаждения. Известно, что при высоких скоростях охлаждения расплава рост кристаллов происходит медленно, при этом образуется мелкокристаллическая структура, обуславливающая пластичность полиэтилена и низкую прочность соединения [1].

Для получения при низких температурах ОВ сварного соединения, прочность которого не ниже чем при сварке в условиях допустимых температур воздуха, необходимо обеспечить в ЗТВ протекание теплового процесса по закономерности, свойственной сварке в условиях температур из регламентированного интервала. Такую динамику температурного поля можно получить предварительным подогревом, оплавлением в стандартном режиме и охлаждением в теплоизоляционной камере или под слоем теплоизоляционного материала. При предварительном подогреве необходимо обеспечить близкое к равномерному распределение температуры из допустимого интервала путем выравнивания температур. Продолжительности подогрева и выравнивания температур эффективнее определять расчетным путем, моделируя нестационарный тепловой процесс. На основе математического моделирования также определяются параметры теплоизоляционной камеры или толщина слоя теплоизоляционного материала. При математическом моделировании нагрева и охлаждения сварного соединения необходимо учитывать поглощение теплоты при плавлении полимерного материала и его выделение – при кристаллизации.

Известно, что полиэтиленовый материал для труб имеет степень кристалличности 55-65 % [2]. При моделировании теплового процесса в изделиях из полимерных материалов для учета теплоты фазового превращения обычно используют уравнение кинетики кристаллизации Аврами-Колмогорова, параметры которого определяют по термограммам ДСК [3–4]. При разработке технологии сварки ПЭ труб при низких температурах необходимо обеспечить охлаждение изделия по заданной закономерности изменения температурного поля, не описывая зарождение и рост кристаллов. В этом случае для учета теплоты фазового превращения в математической модели можно использовать непосредственно термограммы дифференциального сканирующего калориметра (ДСК). В

уравнение теплопроводности, описывающее нестационарное температурное поле в сварном соединении, при использовании метода сквозного счета вводится эффективный коэффициент теплоемкости [5]. Уравнение теплопроводности записывается в виде:

$$\left(c(T) + \rho^- L^{100\%} \frac{dX_c}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(T) \operatorname{grad} T), \quad x \in D, \quad 0 < t \leq t_m, \quad (1)$$

где Q – мощность источника теплоты; $L^{100\%}$ – удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера; X_c – степень кристалличности; c^-, ρ^-, λ^- и c^+, ρ^+, λ^+ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала трубы соответственно.

Степень кристалличности X_c определяется по формуле:

$$X_c(T) = \begin{cases} X_c^\infty, & T \leq T_1, \\ X_c^\infty - \frac{\int_{T_1}^T q(u) du}{L^{100\%} v_T}, & T_1 < T < T_2, \\ 0, & T \geq T_2, \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $q(T)$ – зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК); X_c^∞ – максимальная степень кристалличности исследуемого полимерного материала; v_T – скорость изменения температуры.

При сварке деталями с закладным нагревателем уравнение (4) дополняется условием сосредоточенного источника теплоты. На остальных границах – традиционные граничные условия. Нестационарное температурное поле определяется решением уравнения (1) с заданными начальными и граничными условиями методом конечных элементов [6].

При сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур окружающего воздуха обеспечение в области сварного муфтового соединения изменения температурного поля близкого к динамике, полученной при допустимых температурах воздуха составляет основную идею предлагаемого подхода. Для увеличения глубины проплавления при температурах воздуха ниже минус 15 °С предлагается проведение предварительного подогрева и выравнивания, предшествующих нагреву. Для поддержания необходимого темпа охлаждения внешняя поверхность муфты вместе с трубой укрывается теплоизоляционным материалом. Толщина укрывного материала определяется расчетом.

Список литературы

1. Кайгородов Г.К., Каргин В.Ю. Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. – 2001. – № 2. – С. 13-14.
2. Горюловский М.И., Калугина Е.В., Иванов А.Н., Сатдинова Ф.К. Исследование кристалличности и термостабильности в трубах, полученных из различных видов полиэтилена // Пластические массы. – 2005. – № 4. – С. 9-12.
3. Chebbo Z, Vincent M., Boujlal A. Numerical and Experimental Study of the Electrofusion Welding Process of Polyethylene Pipes // Polymer Engineering And Science.–2015. – V. 55. – № 1. – p. 123-131.
4. Куликова Т.Г., Труфанов Н.А. Численное решение краевой задачи термомеханики для кристаллизующегося вязкоупругого полимера // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1. – № 2. – С. 38-52.
5. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС. 2004. – 784 с.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method: Solid Mechanics. – Burlington: Butterworth-heinemann. 2000.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

В.Н. СТАЦЕНКО, А.Е. СУХОРАДА, В.Е. ЛЕЛЮХИН

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

E-mail: alexeyman_09@mail.ru

Ключевые слова: Сварка трением, тепловложение, алюминиевый сплав, точечная сварка, инструментальная сталь, технологические параметры, концентрические кольца, эксперимент.

Аннотация. В настоящее время наиболее перспективным высокотехнологичным и производительным процессом является сварка трением с перемешиванием. Важным элементом этой технологии является определение температуры материала в зоне перемешивания, которую возможно определить расчетом по величине тепловложения, вносимого в зону сварки. Для определения этой величины проведены экспериментальные исследования зависимости тепловложения от скорости вращения на концентрических кольцах разных диаметров на торце инструмента, который обычно имеет цилиндрическую форму с рабочей торцевой поверхностью, а также заплечики и пин. Для этого выбрана схема экспериментов, в которой свариваемый материал (алюминиевый сплав АМг5) моделируется в виде экспериментальной трубки диаметром 20 мм, а инструмент (из инструментальной стали Р6М5) моделируется в виде рабочей пластины. На спроектированном и изготовленном стенде выполнены исследования зависимости момента трения и удельного тепловложения для скоростей вращения экспериментальной трубки 400-1600 об/мин ($42-167 \text{ с}^{-1}$). При этом за счет усилия сжатия экспериментальной трубки и рабочей пластины поддерживалась постоянная температура места трения. По полученным экспериментальным данным рассчитаны удельные тепловложения и тепловая мощность на каждом концентрическом кольце шириной 2 мм торца рабочего инструмента диаметром 20 мм, а также суммарная тепловая мощность для его скоростей вращения 800 об/мин (84 с^{-1}) и 1600 об/мин (167 с^{-1}), получены зависимости этих величин от радиуса рабочего инструмента.

При проведении экспериментов на стенде определялись тепловые потери теплопроводностью вдоль стержня, на котором закреплена экспериментальная трубка, а также от рабочей пластины из инструментальной стали через прокладку на рабочий стол и конвекцией от поверхности вращающейся экспериментальной трубки в окружающую среду. Результаты расчетов показали, что каждая из этих потерь не превышает 3-10 %, Эти потери учтены в расчетах теплоподвода.

Целью данной работы является нахождение значений тепловложений при точечной сварке трением с перемешиванием, а также оценка диаметра инструмента для необходимого тепловложения.

Выводы

Таким образом, при точечной сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМг5 с использованием инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 для внесения тепловой мощности в 0,5 кВт необходимо использовать инструмент диаметром 10 мм, для тепловой мощности в 1,6 кВт необходим инструмент диаметром 20 мм. При этом максимальное тепловложение от инструмента происходит на радиусе 5–7 мм, что подтверждают ряд представленных графиков. Так же отмечается тот факт, что увеличение тепловой мощности с увеличением радиуса инструмента происходит до определенного момента, в зависимости от скорости вращения, аналогичная ситуация происходит и с тепловложением, где дальнейшее увеличение радиуса не целесообразно.

Рост тепловложения при скорости вращения 167 с^{-1} останавливается на радиусе инструмента $\approx 5 \text{ мм}$, $\approx 5 \text{ мм}$ при скорости вращения 125 с^{-1} снижение отмечается на радиусе $\approx 6 \text{ мм}$, и аналогичная ситуация происходит на других режимах. При повышении скорости вращения инструмента, скорость и интенсивность протекающей пластической деформации увеличивается, а так же выделение тепла за счет пластической деформации увеличивается, соответственно ввод тепла от инструмента снижается и процесс потребляет столько энергии от инструмента сколько необходимо для поддержания процесса.

ЛАЗЕРНАЯ УДАРНАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ ШВОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А.А. ТАРЕВА, Д.М. МЕЛЬНИКОВ, М.А. МЕЛЬНИКОВА, ЗОЙЕ МЬЯТ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: Daenoor@gmail.com

В последние годы набирает популярность технология создания локальной пластической деформации лазерной ударной обработкой (ЛУО) для различных технологических применений. ЛУО – это метод холодной модификации поверхности с помощью мощного импульсного лазерного излучения, имеющий большое значение для повышения усталостной долговечности лопаток газотурбинных двигателей и других деталей, работающих в условиях износа. ЛУО может быть коммерчески использоваться для локальной обработки в случае снижения стоимости оборудования. ЛУО позволяет проводить локальную обработку для таких технологических задач, как микроструктурирование, торможение развития усталостных трещин и постобработка сварных швов. Цель данной работы: исследование технологических особенностей ЛУО с точки зрения применения для улучшения сварных швов алюминиевых сплавов.

Процесс ЛУО схематично показан на рисунке 1.

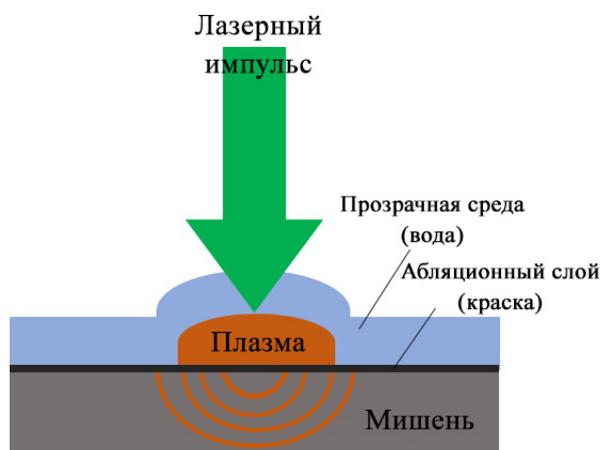


Рисунок 1 – Схема процесса лазерной ударной обработки

Для осуществления процесса необходимо выполнить следующие процедуры. Поверхность мишени покрывается абляционным покрытием. Испарение этого покрытия способствует созданию плазменного факела, расширение которого приводит к генерации короткоимпульсной ударной волны. Для увеличения мощности ударной волны применяется прозрачный для лазерного излучения слой, обычно вода.

Традиционный режим для ЛУО это одиночные (с частотой менее 10 Гц) мощные импульсы с энергией от 10 до 50 Дж, диаметром пятна до 10 мм наносекундной длительности. При низкой частоте сканирования абляционное покрытие обновляется после каждого выстрела. При локальной обработке маломощными импульсами приходится использовать острую фокусировку. Поэтому необходимо работать в режиме килгерцовой частоты следования и большого коэффициента перекрытия. Обновлять покрытие при таком режиме сканирования невозможно, поэтому в данной работе был осуществлён выбор абляционного покрытия, способного выдерживать многократное облучение и эффективно преобразующего лазерную энергию в энергию плазменного факела. Наилучших результатов мы добились при помощи алюминиевой фольги, наклеенной на клейкую ленту.

На рисунке 2 показано распределение микротвёрдости сварного дугового шва из АМг-6 до и после ЛУО. На рисунке выделены две характерных зоны: зона термического влияния и переход к литой зоне. В области перехода наблюдается повышение микротвёрдости до 70 % от значения до обработки, что может быть объяснено структурными изменениями или остаточными напряжениями после ЛУО.

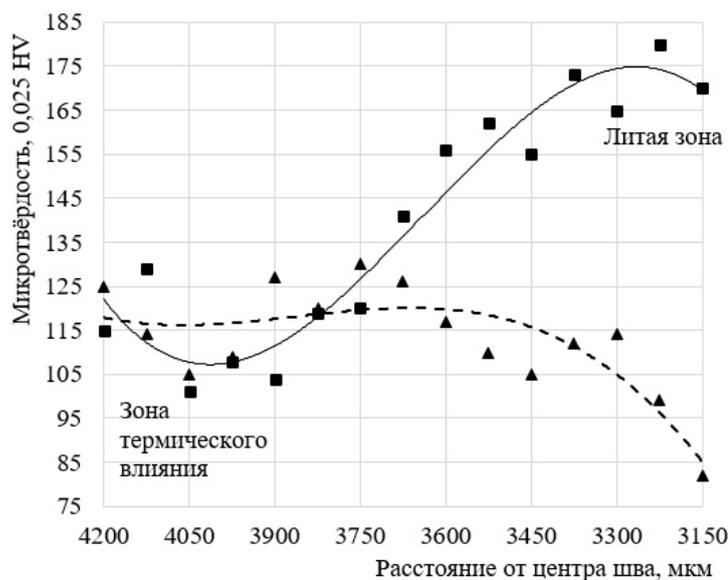


Рисунок 2 – Профиль микротвёрдости вдоль сварного шва до и после ЛУО

Остаточные напряжения измерялись стандартным методом рентгеновской дифракции Брэгга. Измерения производились в зоне термического влияния дуговых сварных швов из сплава АМг-6. Остаточные растягивающие напряжения с амплитудой 15 МПа были преобразованы в остаточные сжимающие напряжения с амплитудой до 50 МПа после ЛУО. Можно утверждать, что изменение знака остаточных напряжений приводит к увеличению усталостной прочности сварного соединения.

Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 17-19-01706.

Список литературы

1. Clauer A. A historical perspective on laser shock peening // Metal Finishing News. – 2001. – №10 – P. 5-6.
2. Luo K., Wang C., Li Y., Luo M., Huang S., Hua X., and Lu J. Effects of laser shock peening and groove spacing on the wear behavior of non-smooth surface fabricated by laser surface texturing // Applied Surface Science. – 2014. – № 313 – 600-606.
3. Yin D., Wang D., Jing H. and Huo L. The effects of ultrasonic peening treatment on the ultralong life fatigue behavior of welded joints // Materials and Design. – 2010. – № 31. – P. 3299-3307.
4. Tani G., Orazi L., Fortunato A., Ascari A. and Campana G. Warm laser shock peening – new developments and process optimization // CIRP Ann. Manuf. Tech. – 2011. – № 60. – P. 219-222.
5. Hackel L., Rankin J.R., Rubenchik A., King W.E., Matthews M. Laser Peening: A Tool for Additive Manufacturing Post-processing // Additive Manufacturing. – 2018. – № 24. – P. 67-75.
6. Kalainathan S., Prabhakaran S. Recent development and future perspectives of low energy laser shock peening // Optics & Laser Technology. – 2016 – № 81. – P. 137-144.
7. Achintha M., Nowell D., Fufari D., Sackett E. E. and Bache M. R. Fatigue behaviour of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modelling // International Journal of Fatigue. – 2016. – № 62. – P. 171-179.
8. Peyre P., Scherpereel X., Berthe L., Carboni C., Fabbro R., Béranger G. and Lemaître C. 2000 Surface modifications induced in 316 L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance // Material Science Engineering A. – 2014. – № 280. – P. 294-302.
9. Peyre R., Scherpereel P., Berthe X. and Fabbro L. Current trends in laser shock processing // Surface Engineering. – 1998 – № 14. – P. 377-380.

10. Cao Z., Che Z., Zou S. and Fei Q. Numerical simulation of residual stress field induced by laser shock processing with square spot // J. Shanghai Univ. – 2011. – № 15. – P. 553–556
11. Gujba A. K. and Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening // Materials – 2014. – № 7. – P. 7925-7974
12. Peyre P, Fabbro R, Merrien P and Lieurade H Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behavior // Material Science Engineering A. – 1996. – № 210 – P. 102–113
13. Guo Y.B., Caslaru R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti–6Al–4V surfaces // Journal of Materials Processing Technology. – 2011 – № 211. – P. 729–736
14. Keller S., Horstmann M., Kashaev N., Klusemann B. Experimentally validated multistep simulation strategy to predict the fatigue crack propagation rate in residual stress fields after laser shock peening // International Journal of Fatigue – 2018 – № 124. – P. 265-276
15. Zhang X., Yang W. and Xiao R. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al–Li alloy 2060 with Al–Mg filler wire // Materials & Design. – 2015. – № 88. – P. 446-450
16. Ruschau J., John R., Thompson S. R. and Nicholas T. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium // International Journal of Fatigue – 1999. – № 21. – P. 199–209
17. Nikolaev G. A., Fridlyander I. N. and Arbutov U. P. Welded aluminum alloys. – Moscow: Metallurgiya, 1990. – 296 p.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

Е.В. ТЕРЕНТЬЕВ, В.К. ДРАГУНОВ, А.П. СЛИВА, А.Л. ГОНЧАРОВ, А.Ю. МАРЧЕНКОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

E-mail: egor.terentyev@mail.ru

В работе приведен обзор существующих аналитических методов расчетов режимов электронно-лучевой сварки (ЭЛС), обеспечивающих получение швов с требуемой глубиной проплавления. Рассмотрены условия, при которых могут быть применены те или иные расчетные методики. Показаны основные недостатки существующих методик, в частности, большинство расчетных методик, позволяющих установить взаимосвязь энергетических характеристик пучка с глубиной проплавления, получены опытным путем и содержат в себе эмпирические коэффициенты, в результате чего они корректно работают только в довольно узком диапазоне параметров режимов и свариваемых материалов. Численные методы и использование сложных моделей взаимодействия электронного пучка с материалом позволяют получать довольно точные результаты после верификации, но значительные вычислительные мощности, высокая стоимость программного обеспечения и длительность процесса сильно ограничивают возможность их применения в условиях производства. Поскольку отработка режимов ЭЛС всегда сопровождается необходимостью предварительного выбора мощности электронного пучка, обеспечивающего требуемую глубину проплавления, задача определения тока пучка с использованием минимальных временных и программных ресурсов остается весьма актуальной.

Целью данной работы является разработка универсальной аналитической методики расчета мощности электронного пучка при ЭЛС с глубоким проплавлением, обеспечивающей заданную глубину проплавления, которая может быть применена для широкого спектра материалов при различных скоростях сварки.

Разработка методики основана на математической модели движущегося цилиндрического теплового источника, которая предполагает перемещение цилиндра с постоянной температурой поверхности в бесконечной пластине. Цилиндрический тепловой источник имитирует движение парогазового канала при электронно-лучевой сварке. Температура поверхности канала принята постоянной, и при сварке многокомпонентных сплавов определяется по известной расчетной схеме, исходя из давления паров в канале проплавления. Кроме того, в расчетной методике предусмотрен учет потерь энергии на плавление и частичное испарение металла.

Приведены сравнительные результаты экспериментальных данных с расчетными, полученными с использованием разработанной методики и существующими методиками. Показано, что предлагаемая методика позволяет рассчитывать требуемую мощность электронного пучка с точностью не менее 10% для различных материалов, тогда как существующие методики позволяют получать результаты с приемлемой точностью либо в довольно узком диапазоне свариваемых материалов и скоростей сварки, либо требуют проведения дополнительных экспериментов.

Таким образом, разработанная расчетная методика позволяет определять требуемую мощность электронного луча для ЭЛС материалов, в том числе сложнолегированных сплавов, в зависимости от скорости сварки, диаметра парогазового канала и теплофизических свойств, с учетом затраты на плавление и частичное испарение металла, с точностью не менее 10%.

Установлено, для сохранения постоянной глубины мощность электронного луча необходимо изменять практически пропорционально скорости сварки.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ А306.13

В.С. ТЫНЧЕНКО, А.В. МУРЫГИН, В.Е. ПЕТРЕНКО

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика
М.Ф. Решетнева, г. Красноярск
E-mail: Dpblra@inbox.ru

Формирование сварного соединения в процессе электронно-лучевой сварки сопряжено с необходимостью отработки и поддержания технологических параметров процесса в допустимых пределах отклонений. Установка электронно-лучевой сварки А306.13 состоит из следующих функциональных блоков:

- Блок фокусировки электронного пучка;
- Блок управления током луча;
- Блок отклоняющей системы;
- Блок управления накалом пушки
- Блок ускоряющего напряжения
- Блок управления скоростью сварки

Ранее на установке А306.13 для задания скорости сварки использовался нерегулируемый электропривод, который не обеспечивал требуемой точности. Кроме того, возникала проблема повышения точности задания параметров технологического процесса в целом, а также их регистрации и индикации.

Разработка программного обеспечения была определена как способ обеспечения взаимосвязи функциональных блоков системы таким образом, чтобы обеспечить оператору возможность мониторинга и настройки технологического процесса в удобной форме, снижающей негативное влияние человеческого фактора. Использование программного обеспечения позволяет добиться более точного задания параметров технологического процесса, оперативной регистрации и индикации. Такое решение позволяет ускорить процесс наладки процесса, ведет к снижению количество брака при работе с системой, связанного с человеческим фактором или нестабильностью поддержания технологических параметров.

Программное обеспечение позволяет вести мониторинг следующих параметров технологического процесса:

- ускоряющее напряжение;
- ток накала пушки;
- ток фокусировки электронного пучка;
- ток электронного луча;
- скорость сварки.

Программное обеспечение реализует два режима управления технологическим процессом ручной и автоматический. В первом случае программное обеспечение позволяет оператору настраивать параметры технологического процесса и изменять непосредственно во время сварки. Кроме того, данный режим используется для предварительной отработки и выбора параметров, которые будут использованы в автоматическом. Таким образом завершив изменение параметров, оператор использует элемент управления на форме приложения, позволяющий запомнить текущие параметры. После чего появляется возможность использовать последние в автоматическом режиме процесса сварки. Автоматический режим заключается в поддержании заданных ранее, или загруженных из памяти технологических параметров: скорости сварки, тока луча, тока фокусировки, времени ввода-вывода луча, диаметра свариваемого изделия. После запуска процесса сварки в автоматическом режиме программное обеспечение контролирует ввод электронного пучка, его поддержание до достижения полного оборота изделия с момента ввода луча и последующий вывод луча.

Таким образом достигается гибкость в наладке технологического процесса, поддержание стабильных параметров, оказывающих влияние на формирование сварного соединения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАТОРОВ В ПОКРЫТИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ИХ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА

Н.И. УРБАНОВИЧ, Т.И. БЕНДИК, К.Э. БАРАНОВСКИЙ, Е.В. РОЗЕНБЕРГ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
E-mail: urbanovichbntu@tut.by

На сегодняшний день в сварочной промышленности и строительстве значение ручной дуговой сварки, как способа получения неразъемных соединений металлоконструкций не уменьшается, особенно, при монтаже, реконструкции и ремонте трубопроводов, емкостей и других технических устройств опасных производственных объектов. Высокое качество сварных соединений достигается, в первую очередь, благодаря использованию качественных сварочных материалов, соответствующих специальным требованиям. Несмотря на то, что в рекламных изданиях характеристики электродов, выпускаемые производителями, почти всегда соответствуют действующим стандартам, качество их, а также механические свойства сварных соединений, полученных с использованием данных электродов, существенно различаются. Поэтому вопрос повышения качества металлических покрытых электродов остается актуальным. Улучшение показателей, характеризующих сварочно-технологические свойства электродов и свойства металла шва, может быть достигнуто различными путями, в том числе путем применения модифицирования.

Целью данной работы являлось исследование влияния модифицирующей добавки в покрытие электрода на их сварочно-технологические и механические свойства металла шва.

В качестве модифицирующей добавки использовали модификатор, имеющий в своем составе такие химические элементы, как Ba, Sr, K, Si, Al, V и представляющий смесь устойчивых соединений щелочноземельных металлов в виде карбонатов.

Исследования проводили на электродах марки УОНИ-13/55. Модифицирующую добавку в покрытие электрода вводили двумя способами: в состав сухой шихты перед их опрессовкой и на поверхность стандартного покрытия тонким слоем со связующим жидким стеклом.

Анализ испытаний электродов на сварочно - технологические свойства показал, что модифицирующая добавка независимо от способа ввода позволила увеличить длину разрывной дуги на 23-27%, продолжительность горения на 30-35%, а также повысить ее устойчивость.

Результаты анализа металла шва на растяжение позволили установить, что показатели предела прочности металла швов, полученные электродами со стандартным покрытием и экспериментальными, практически имеют одинаковое значение. При этом предел текучести повысился от 428 МПа для металла шва, выполненного стандартным электродом до 435 МПа - экспериментальными электродами. Следует отметить некоторое повышение такого показателя, как относительное удлинение, значение которого повысилось на 20 - 23% у металла шва, полученного экспериментальными электродами по-сравнению со стандартным электродом.

Также необходимо отметить, что модифицирующая добавка, независимо от способа ее ввода в покрытие электрода, позволила получить более мелкозернистую структуру металла шва по-сравнению с металлом шва, полученного стандартным электродом.

Таким образом, установлено, что модифицирующая добавка, введенная в покрытие электродов будь-то способом нанесения ее со связующим на поверхность стандартного покрытия или способом ввода в состав сухой шихты перед их опрессовкой, позволила повысить сварочно-технологические характеристики электрода и измельчить структуру металла шва, что обусловило повышение его механических свойств, особенно пластичности металла шва, что будет способствовать повышению сопротивляемости образованию горячих трещин и вероятно холодных.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ ПРИЖИМОВ

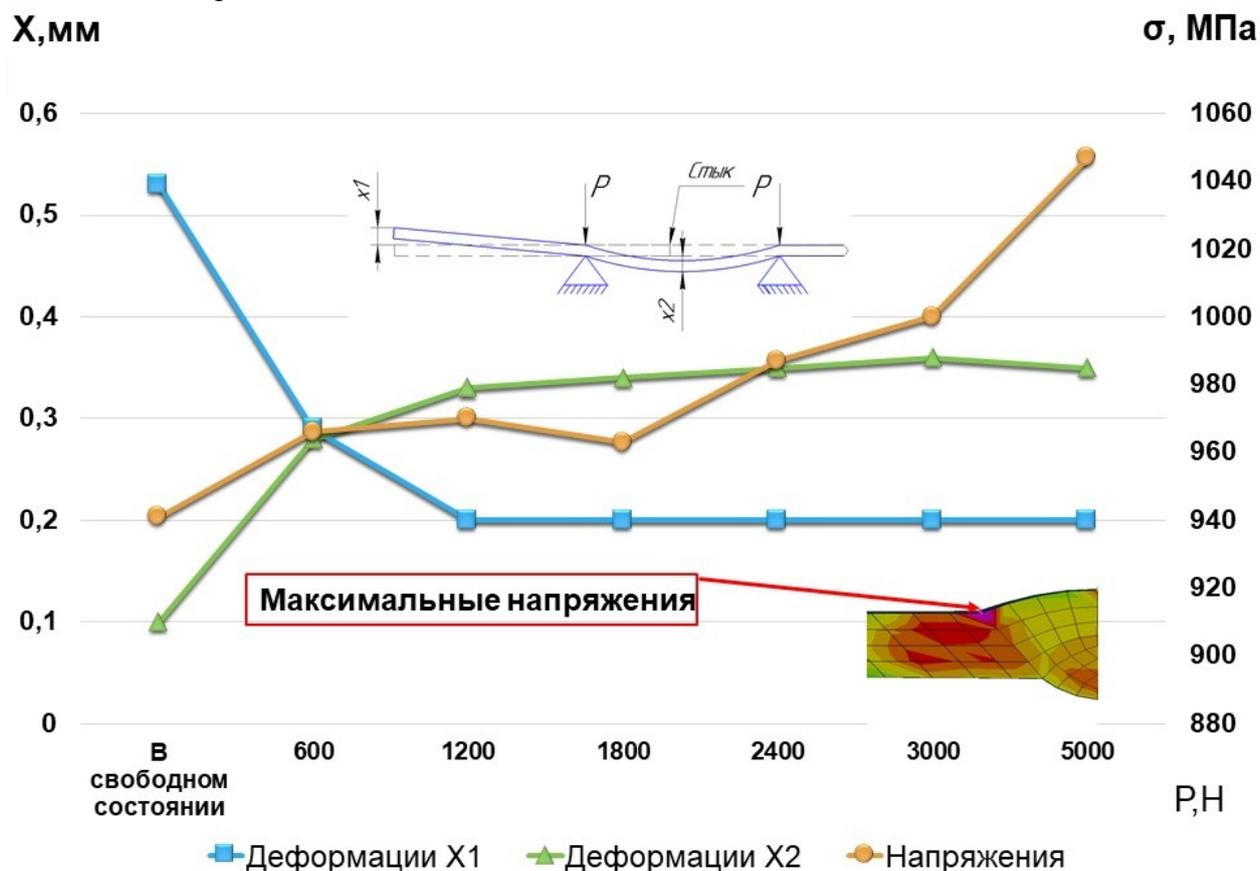
Р.У. ХАЙБРАХМАНОВ, Ю.С. КОРОБОВ, Г.А. БИЛЕНКО

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
E-mail: R.U.Khaybrakhmanov@mail.ru

Целью работы является снижение уровня остаточных сварочных деформаций без существенного повышения остаточных напряжений. Для достижения этой цели разработана схема адаптивных прижимов, которые меняют свою жесткость в зависимости от напряжений в сварном соединении. Чтобы реализовать эту схему, была выполнена оценка развития напряженно-деформированного состояния (НДС) во времени путем конечно-элементного анализа применительно к обечайке, являющейся характерной тонколистовой деталью. Рассмотрим влияние адаптивных прижимов на НДС обечайки.

При моделировании процесса сварки выполнен поиск усилия адаптивного прижима, при котором после сварки уровень деформации поверхности детали в рассматриваемом сечении будет наименьшим, при этом значение остаточных напряжений повысится незначительно, чтобы не увеличить вероятность образования трещин.

Результаты. В результате решения термомеханической задачи были определены максимальные напряжения и деформации в зависимости от заданного усилия, приведенные на рисунке. При анализе данных выявлено, что существует такое критическое значение усилия $R_{кр}$, при котором область максимальных деформации меняет свою локализацию. По графикам рисунка 5 видно, что наименьшие деформации наблюдаются при усилнии 600 Н, остаточные деформации снизились на 45%, по сравнению со случаем сварки в свободном состоянии, а напряжения повысились всего на 3%.



Изменение максимальных остаточные напряжений и деформаций в зависимости от P

Механические испытания показали, что при сварке в свободном состоянии прочность и пластичность сварного соединения увеличены в сравнении с жестким закреплением.

Предположительно, связано это с благоприятным условием кристаллизации металла шва. Прочность сварного соединения на растяжение с применением прижима увеличена на 67%, угол изгиба – на 20%, в сравнение с жестким закреплением.

Рентгенографический контроль показал отсутствие трещин в сварных соединениях, т.е. уровень напряжений не достиг предела прочности ни в одном случае. Деформации при сварке в свободном состоянии составили 0,55 мм, с применением прижима – 0,45 мм, при жестком закреплении – 0,4 мм. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 11%.

Выводы. Разработана модель деформации тонколистовой конструкции из высокопрочной стали при сварке путем компьютерных расчетов в SYSWELD.

Расхождения между расчетами и экспериментальными данными не превысили 11%.

Экспериментальная проверка влияния адаптивного прижима на НДС пластин показала схожее значение деформации, а отсутствие трещин на рентгеновских снимках указывает на то что остаточные напряжения в пластинах ниже предела прочности.

По результатам расчетов выявлено снижение деформации пластин на 45% при применении прижима с изменяемой жесткостью, при этом не значительно увеличилась величина остаточных напряжений составившие 3%. Предположено, что вероятность трещинообразования останется на прежнем уровне.

Согласно полученным данным можно судить об уровне остаточных напряжений и деформации как при сварке стыкового шва пластин, так и при сварке продольного шва обечайки. Адаптивный прижим можно реализовать в пневматических, гидравлических, а также в механических сварочных приспособлениях.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТАВОК

И.А. ХАРИТОНОВ, В.К. ДРАГУНОВ, А.Л. ГОНЧАРОВ, В.Н. МАРТЫНОВ, М.А. ПОРТНОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

E-mail: ivan540@mail.ru

В настоящее время, несмотря на существующие трудности сварки разнородных материалов, комбинированные конструкции достаточно широко используются в промышленности. Эта тенденция обусловлена не только экономическими факторами, которые зачастую играют одну из важнейших ролей при создании и разработке конструкции, но и эксплуатационными требованиями.

Применение электронного луча, как источника теплоты при сварке, решает ряд важных задач соединения разнородных материалов. Однако, на данный момент существующие технологические приемы, используемые при электронно-лучевой сварке, не обеспечивают в полной мере требуемые физико-химические свойства сварного шва. В связи с этим, разработка новых технологических приемов, обеспечивающих требуемый состав и структуру металла шва за счет его легирования, имеет научную и практическую значимость.

Целью работы является исследование формирования сварных соединений, выполненных электронным лучом, с использованием промежуточных вставок небольшой толщины в узком зазоре.

Для достижения поставленной цели в работе определили режимы сварки (ток луча, скорость сварки, параметры развертки), а также размеры вставки и зазоров между самой вставкой и основным материалом. В результате установили, что для стабильного формирования шва минимальная ширина вставки должна составлять не менее 1 мм при толщине свариваемых деталей до 20 мм, а для толщин 25 и 30 мм – 1,5 мм. При этом минимальный зазор, обеспечивающий затекание материала вставки в разделку, составляет 0,3 мм. Использование круговой развертки диаметром 1,2 мм или колебаний пучка поперек стыка с амплитудой 1 мм и частотой 100-200 Гц устраняет непровары в корне шва. Поскольку плавление кромок основного материала в большей степени происходит за счет расплавленного материала вставки, то термический КПД, по сравнению со сваркой материалов встык, выше на 10-15%.

Данный технологический прием позволяет получать сварной шов с минимальной долей проплавления основного материала при электронно-лучевой сварке разнородных металлов и сплавов, при этом легирование шва осуществляется в основном за счет материала вставки.

ОЦЕНКА РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАДИИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Н.А. ЧЕРНЯКОВА

Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, СКТБ «Наука», г. Красноярск
E-mail: fortuna@ict.nsc.ru

Актуальность оценки ресурса сварных конструкций и их элементов сохраняется на протяжении многих десятилетий. Помимо оценок ресурса на стадии проектирования не менее важными являются вопросы оценки ресурса сварных конструкций на стадии эксплуатации с определением остаточного ресурса. Для их решения, помимо нормативно-технических документов, активно используются расчетно-экспериментальные методы механики деформирования и разрушения на основе результатов технического диагностирования и освидетельствования.

Для расчетных оценок ресурса на стадии роста усталостных трещин наряду с классическими подходами, использующими эмпирические модели роста трещин (Пэрис, Формен, Ярема), целесообразно применение многопараметрических моделей роста трещин (РТ), позволяющих оценивать влияние вариаций параметров, определяющих кинетику трещин в сварных конструкциях.

Данные модели скорости роста усталостных трещин позволяют учитывать статистические особенности параметров и размеры зоны необратимых циклических повреждений. В работе развита модифицированная многопараметрическая модель скорости роста усталостных трещин, с основными параметрами: характерный размер зоны необратимых циклических повреждений, механические и циклические свойства материала, начальный размер дефекта и амплитудно-частотные характеристики материала.

Особый интерес в данном направлении представляет количественная оценка статистических эффектов. При оценках ресурса сварных элементов конструкций используется статистическое моделирование (метод Монте-Карло), позволяющий выполнить оценки ресурса с учетом обоснованных статистических законов распределений основных параметров модели РТ (начальные размеры дефектов – распределение Вейбулла, для составляющих амплитуд напряжения – распределения Релея; для предела текучести металла и критического коэффициента интенсивности напряжений – нормального распределения).

На основе предложенной модели проведены оценки ресурса и надежности в статистической постановке типовых сварных соединений, магистральных трубопроводов, резервуаров, сосудов давления.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА МАРГАНЦА В СОСТАВЕ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ЗДОРОВЬЕ СВАРЩИКА И ПУТИ ЕГО СНИЖЕНИЯ

Д.А. ЧИНАХОВ^{1,а}, Д.П. ИЛЬЯЩЕНКО^{1,б}, Е.Д. ЧИНАХОВА

¹ Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ, Кемеровская область, Юрга
E-mail: ^а chinakhov@tpu.ru, ^б mita8@rambler.ru

Процессы сварочного производства считаются вредными для организма человека, поскольку помимо шума и светового излучения в область рабочей зоны всегда поступает некоторое количество сварочных аэрозолей (СА). Известно, что помимо газовой составляющей СА, в окружающую среду попадает много сварочной пыли, которая является результатом окисления на воздухе испаренного металла, а так же защитного газа, легирующих металлов и флюса. Химический состав СА, если говорить о твердой составляющей, зависит, в первую очередь, от типа используемых присадочных материалов. При контакте сварочной дуги с металлом, испарения, попадая в воздух над рабочей зоной, постепенно окисляются, вследствие чего образуется мелкодисперсная пыль [1-2].

Проникновение в организм нано- и микро-пылевых частиц оксидов железа, марганца и кремния и других металлов, запускает ряд естественных защитных механизмов, что в свою очередь может привести не только к активации макрофагов, но и к возникновению воспалительных процессов и как следствие развитию ряда заболеваний [3-5].

Одним из самыми вредных веществ [7-15] при сварочных работах считаются оксиды марганца (40% от всей части пыли), которые способны вызывать органические поражения нервной системы, нарушить работу легких, печени и кровеносной системы.

Проведенный обзор литературных источников [1-15] позволил установить, что снизить негативное влияние марганца и других элементов на организм человека можно следующим образом:

1. Использовать специальные средства защиты органов дыхания сварщика (вентиляции и индивидуальных средств защиты сварщика).
2. Уменьшить количество марганца и его соединений в сварочной аэрозоли (технология сварки, источники питания, современные сварочные материалы).
3. Снизить содержание марганца в организме человека, выводя его медикаментами.

Цель работы: оценка снижения качественного и количественного содержания Mn в составе сварочного аэрозоля ручной дуговой сварки покрытыми электродами (ММА) с применением современных инверторных источников питания.

Оценку стабильности процесса сварки осуществляли с помощью статистической обработки осциллограмм сварочного тока и напряжения от источников питания, имеющих различные динамические характеристики. В качестве основных источников питания были выбраны: источник питания, изготовленный по классической схеме сварочного выпрямителя – типа ВД-306Э и, источника питания инверторного типа Небула 315.

Анализ осциллограмм показал уменьшение времени перехода капли и увеличение количества коротких замыканий при использовании инверторного источника питания, то есть происходит более мелкокапельный перенос электродного металла, что оказывает влияние на химический состав наплавленного металла [72].

Таблица – Удельные выделения (г/кг) СА и их компонентов

Марка электрода (диаметр, мм)	Источник питания – выпрямитель	СА	CrO ₃	Cr ₂ O ₃	Mn	Ni	F раств	F нераств
Цл-11	Диодный	10,48	0,48	0,26	0,31	0,26	0,50	0,51
	Инверторный	8,07	0,37	0,20	0,24	0,20	0,42	0,42

По результатам проведенных исследований установлено, что использование инверторных выпрямителей способствует улучшению санитарно-гигиенических условий труда сварщика ММА [77], по сравнению с диодным выпрямителем, а именно снижению: количественной составляющей сварочного аэрозоля с 0,257 до 0,2 (19%), марганца с 0,007 до 0,005 (23%), оксида хрома с 0,012 до 0,09 (24%), т.е. снижается риск токсичного отравления и воспаления слизистой оболочки дыхательных путей сварщика и вспомогательных рабочих.

Проведенные исследования показали, что применение инверторного источника питания, по сравнению с диодным выпрямителем, способствует:

1. обеспечению мелкокапельному переносу электродного металла снижению времени их формирования на 46% и перехода на 28%;
2. обеспечивает переход легирующих элементов из сварочных материалов в наплавленный металл на 6% и снижает его потери из линии сплавления на 6% и ЗТВ на 3%;
3. снижению интенсивности образования (г/мин) СА и их компонентов на 23%;
4. снижению удельные выделения СА и их компонентов на 23%.

Список литературы

1. Isaxon C., Dierschke K., Pagels J., Löndah J., Gudmundsson A., Hagerman I., Berglund M., Wierzbicka A., Assarsson E., Andersson U.B., Jönsson B.A.G., Messing M.E., Nielsen J., Bohgard M. Novel system for source characterization and controlled human exposure to nanoparticle aggregates generated during gas-metal arc welding // *Aer. Sci. Tech.* – 2013. – Vol. 47. – P. 52-59.
2. Zheng, W., Antonini, J.M., Lin, Y.-C., Roberts, J.R., Kashon, M.L., Castranova, V., Kan, H. Cardiovascular effects in rats after intratracheal instillation of metal welding particles (2015) *Inhalation Toxicology*, 27 (1), pp. 45-53.
3. Kim JY, Chen JC, Boyce PD, Christiani DC: Exposure to welding fumes is associated with acute systemic inflammatory responses. *Occup Environ Med* 2005, 62: 157-163.
4. Andujar, P., Simon-Deckers, A., Galateau-Sallé, F., Fayard, B., Beaune, G., Clin, B., Billon-Galland, M.-A., (...), Lanone, S. Role of metal oxide nanoparticles in histopathological changes observed in the lung of welders (2014) *Particle and Fibre Toxicology*, 11 (1), art. no. 23.
5. Оценка экологической вредности нано- и микрочастиц сварочного аэрозоля и их воздействия на организмы: диссертация ... кандидата Биологических наук: 03.02.08 / Кириченко Константин Юрьевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет»], 2018.
6. Physical and Chemical Characterization of Airborne Particles from Welding Operations in Automotive Plants. Jean Dasch & James D'Arcy. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* Vol. 5, Iss. 7, 2008.
7. Immunotoxicology of arc welding fume: Worker and experimental animal studies. Patti C. Zeidler-Erdely, Aaron Erdely & James M. Antonini. *Journal of Immunotoxicology* Vol. 9, Iss. 4, 2012.
8. Чашин М.В., Кабушка Я.С., Кузьмин А.В., Васильева Т.Н., Скобникова Г.В. Оценка влияния воздействия наноразмерных аэрозолей на респираторный тракт // В сб.: «Актуальные вопросы эколого-зависимых и профессиональных респираторных заболеваний». 2014а. – С. 134-137.
9. Металлургия дуговой сварки: процессы в дуге и плавление электродов / Под. ред. И.К. Походня. - К: Наукова думка, 1990. – 222 с.
10. Ильященко, Д.П. Улучшение санитарно-гигиенических характеристик условий процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами / Д.П. Ильященко, Д.А. Чинахов // *Технология металлов.* – 2013. – № 4. – С. 34-37.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И АДГЕЗИОННОГО ТРЕНИЯ

А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, А.В. ГУСАРОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: tch7av@gmail.com

В современной промышленной и научно-технической сфере одним из наиболее актуальных методов изготовления различных деталей из алюминиевых сплавов, обладающих низкой массой и высокой прочностью, является сварка трением с перемешиванием. Данный метод сварки является высокотехнологичным и востребованным в современном производстве, и поэтому в настоящее время в научной сфере активно проводятся исследовательские работы в данном направлении. Процессы, происходящие при фрикционном перемешивающем взаимодействии, используются также и для получения высокопрочных ультрамелкодисперсных структур на поверхности деталей. В основном работы в области сварки трением с перемешиванием сводятся к исследованиям прикладного характера, и лишь небольшое количество работ относится к исследованиям фундаментального характера, направленным на изучение физической природы данной технологии. Одним из основных аспектов процесса сварки трением с перемешиванием является адгезионный контакт инструмента и материала свариваемых деталей, в ходе которого формируется ультрамелкодисперсная структура материала, впоследствии перемешиваемая при движении инструмента. Настоящая работа посвящена выявлению взаимосвязи процессов, происходящих при адгезионном трении и сварке трением с перемешиванием образцов алюминиевых сплавов.

Испытания на сухое трение по схеме "диск-палец" проводили на лабораторной установке при различных температурах в паре со стальным контртелом из стали 40Х13. Испытания проводили при температуре от 20 до 400 градусов Цельсия. Нагрузку на образец устанавливали в одном интервале для каждой серии испытываемых образцов. Сварку трением с перемешиванием осуществляли на лабораторной установке при различных параметрах осевого давления, скорости вращения инструмента и скорости продольного перемещения. Сопоставление деформационных процессов при сварке трением с перемешиванием и адгезионном трении проводили путем анализа структуры на металлографических шлифах методом оптической и растровой электронной микроскопии.

Проведенные исследования показывают, что в процессе адгезионного фрикционного контакта, аналогично со сваркой трением с перемешиванием происходит образование аналогичных со сваркой трением с перемешиванием структурных зон. При изменении параметров адгезионного взаимодействия в условиях трения изменяется глубина деформированного и фрагментированных слоев. Изменение параметров процесса трения влияет на распределение основных структурных зон в поверхностных слоях материала. Изменение температуры в зоне трения до температур порядка 200 градусов Цельсия приводит к повышению адгезионной составляющей в процессе деформации и изнашивания, при дальнейшем повышении температуры интенсивность адгезионной составляющей снижается. Аналогично при перегреве в зоне сварки трением с перемешиванием происходит уменьшение вовлекаемого в процесс материала вокруг инструмента и получение некачественного шва в результате недостаточного перемешивания компонентов системы.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23 и проекта РФФИ р_мол_а № 18-48-703046.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, А.В. ГУСАРОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: tch7av@gmail.com

Развитие технологии получения неразъемных соединений ведется как в сторону получения сварных швов из металлов и сплавов, несвариваемых традиционными методами, так и для повышения прочностных свойств ограниченно свариваемых материалов или для повышения производительности процесса сварки из металлов, обладающих хорошей свариваемостью. Среди высокопроизводительных методов получения неразъемных соединений нового поколения выделяется метод гибридной лазерной сварки, позволяющий получать соединения с высокой скоростью из различных металлов и сплавов с достаточно большой толщиной свариваемых листов. Сварные соединения, полученные данным методом в предыдущих работах из различных сталей и сплавов обладают высокой прочностью, для многих материалов превышающей прочность основного металла или остающейся на уровне основного металла. Соединения стали 09Г2С обладали прочностью выше, чем у основного металла, соединения стали 12Х18Н10Т обладали прочностью равной прочности основного металла. При этом на настоящее время недостаточно сведений о деформационном поведении материалов, полученных методом гибридной лазерной сварки в испытаниях на циклическую прочность, что затрудняет эксплуатацию таких соединений в различных условиях реальных эксплуатационных режимов. Целью настоящей работы является определение усталостных характеристик и деформационного поведения при циклических испытаниях по схеме "растяжение-разгрузка".

Исследованы закономерности деформации и разрушения неразъемных соединений стали феррито-перлитной 09Г2С и аустенитной 12Х18Н10Т, полученных методом гибридной лазерной сварки в испытаниях на циклическую прочность. Проведенные испытания на циклическую прочность показывают, что образцы, полученные в настоящей работе обладают высокой устойчивостью к разрушению при циклическом нагружении вплоть до максимальных напряжений в цикле 0,9-0,95 от предела прочности. Разрушение образцов существенно зависит от амплитуды напряжений, что определяется по степени пластической деформации до разрушения и локализации области разрыва. Наличие дефектов оказывает существенное влияние на процесс деформации, снижая количество циклов до разрушения. Образцы стали 09Г2С при высоких значениях максимального напряжения в цикле разрушаются преимущественно за пределами сварного шва, образцы стали 12Х18Н10Т - в околошовной зоне, при этом для аустенитной стали значение относительного удлинения при разрыве выше, чем у феррито-перлитной. При малых значениях максимального напряжения в цикле на уровне 0,70-0,75 от предела прочности в обоих материалах характерно высокое значение количество циклов до разрушения (более 100 тысяч) и локализация разрушения в зоне сварного шва.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.607.21.0190, идентификатор проекта RFMEFI60717X0190).

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ

А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, А.В. ГУСАРОВА, К.Н. КАЛАШНИКОВ, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

E-mail: tch7av@gmail.com

Целью работы являлось изучение закономерностей формирования структур при сварке трением с перемешиванием разнородных металлов и сплавов, образующих в соединении твердые растворы и интерметаллидные фазы. Получение таких структур имеет принципиальное значение с точки зрения формирования износостойких материалов в поверхностных слоях при фрикционной перемешивающей обработке. В работе в качестве пары металлов использована медь марки М1 и алюминиевый сплав АМг5. Сварку осуществляли внахлест, располагая алюминиевый лист над медным. Исследования полученных структур проводили методами оптической и растровой микроскопии, измерений микротвердости и энергодисперсионного анализа.

Проведенные исследования показывают, что структура металла в зоне формирования соединений имеет сложный и неоднородный характер. Структура представлена слоистым строением с чередованием интерметаллидных слоев, твердых растворов и невзаимодействовавших между собой металлов. Распределение твердых растворов и интерметаллидных фаз вглубь образца отмечается далеко за пределы зоны перемешивания. В ряде областей зоны перемешивания материалов наблюдаются эффекты, предположительно связанные с перегревом алюминиевого сплава вплоть до температуры плавления и выше.

Таким образом, удалось получить структуру, представленную смесью фаз, состоящих из твердых интерметаллидных частиц помещенных в пластичную матрицу из твердых растворов. Такая структура должна обладать оптимальным строением с точки зрения трибологической стабильности, что будет исследовано в дальнейшей работе.

Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013-2020 годы, направление III.23 и РФФИ № 18-38-00645.

АДДИТИВНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТОДОМ ЕВМ ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ СТАЛИ 12Х18Н9Т И ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, К.Н. КАЛАШНИКОВ, А.В. ГУСАРОВА, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

E-mail: tch7av@gmail.com

При изготовлении образцов с использованием электронно-лучевой аддитивной технологии формирования ванны расплава, кристаллизации металла и охлаждения напечатанных слоев сталей и сплавов изменяется от слоя к слою при удалении от подложки, так как температура и время термического воздействия различны для каждого слоя материала. Вследствие этого, прочностные характеристики напечатанных слоев могут существенно отличаться. Это обусловлено прохождением различных фазовых превращений в применяемых исходных материалах в процессе производства, таких как твердорастворное упрочнение в сталях, структурно-фазовые α - β превращения в титановых сплавах и т.д. Возникает градиент механических свойств (таких как предел текучести и прочности), который следует учитывать при производстве и проектировании изделий. Влияние получаемых структур сплава ВТ6 и стали 12Х18Н9Т на механические свойства исследовано в настоящей работе.

Исследования образцов титанового сплава ВТ6 и стали 12Х18Н9Т проводили методами оптической и растровой микроскопии. Определение механических свойств производили на универсальной испытательной машине в испытаниях на растяжение вдоль и поперек слоев.

Влияние параметров процесса нанесения на структуру, и, следовательно, на свойства полученных материалов существенно различно. Так, например, на получение образцов из стали 12Х18Н9Т, изменение параметров процесса изготовления не существенно влияет на структуру и свойства полученных образцов, в то время как у титанового сплава ВТ6 существенную роль на процесс пластической деформации и разрушения оказывает получаемая при печати столбчатая крупнодендритная (крепнозернистая) структура. Об этом свидетельствует междендритный или межзеренный характер разрушения сплава ВТ6 в различных областях. Проведенные исследования показывают, что получаемая слоистая структура при печати металлических материалов оказывает влияние на свойства полученных изделий в различной степени в зависимости от физической природы выбранного для печати материала.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНО-ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, К.Н. КАЛАШНИКОВ, А.В. ГУСАРОВА, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: tch7av@gmail.com

В настоящее время в области создания деталей сложной формы для узлов и агрегатов машин и механизмов широко применяются методы аддитивного производства. К таким методам относятся селективное лазерное, электронно-лучевое или электро-дуговое расплавление филамента в среде защитного газа, на воздухе или в вакууме, с использованием проволочного или порошкового филаментов. Каждая из перечисленных технологий обладает своими преимуществами и недостатками. Наиболее эффективным методом создания материалов с наличием функционального градиента в структуре является проволочная электронно-лучевая аддитивная технология, с печатью материалов в условии вакуума. При изготовлении деталей в условиях мультипроволочного производства возможно получение плавного градиента от одного материала – к другому за счет управления подачей филамента от двух и более податчиков. При этом к недостаткам данного способа получения изделий можно отнести получаемую в объеме металла литую, достаточно малопрочную структуру, а также наличие различных типов дефектов. По этой причине данная технология имеет ряд ограничений по получению деталей с высокопрочной структурой отдельных зон, в том числе поверхностного слоя, а также деталей триботехнического назначения. Уменьшить количество дефектов в виде неоднородностей распределения компонент системы и пор, увеличить механическую прочность материала и сформировать благоприятное с точки зрения механической прочности строение возможно с применением комплексной технологии получения материала с использованием аддитивной электронно-лучевой технологии и фрикционной перемешивающей обработки. Целью данной работы являлось определение применимости гибридной аддитивно-термомеханической технологии с точки зрения получения материалов с более прочной и однородной структурой в сравнении со структурой аддитивно-полученных исходных материалов.

В настоящей работе методом оптической и растровой электронной микроскопии исследовано структурно-фазовое состояние градиентных структур, полученных в ходе проведения аддитивного электронно-лучевого получения, фрикционной перемешивающей обработки и гибридной аддитивно-термомеханической технологии. Выявлены характерные особенности образования дефектов в материалах, полученных аддитивным методом. Определены особенности "залечивания" дефектов в аддитивных материалах после фрикционной перемешивающей обработки. В испытаниях на растяжение измерены механические свойства образцов до и после проведения последующей постобработки в алюминиевых сплавах.

Работа по получению и исследованиям структуры образцов методом аддитивного производства выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23. Фрикционная перемешивающая обработка листового проката и аддитивно-полученных материалов произведена за счет гранта Российского Научного Фонда (Проект № 19-79-00136).

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.В. ЧУМАЕВСКИЙ, В. УТЯГАНОВА, К.С. ОСИПОВИЧ, К.Н. КАЛАШНИКОВ, Т.А. КАЛАШНИКОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
E-mail: tch7av@gmail.com

Формирование материалов с наличием градиента по структуре или свойствам является одной из приоритетных задач в настоящее время. Наиболее интересными методиками получения материалов с такими структурами являются различные способы аддитивного производства. К таким методам относится лазерная или электронно-лучевая технологии с применением порошкового или проволочного филамента. Для получения материалов сложной структуры из металлов и сплавов, склонных к образованию оксидов, применяется методики, основанные на получении материалов в вакуумной камере или с обдувкой инертным газом.

В настоящей работе для получения материалов с наличием функционального градиента используется электронно-лучевая проволочная технология. Изготовление полиметаллических образцов из разнородных материалов производили из стали 12Х18Н9Т, титанового сплава ВТ6 и меди марки М1 в различных сочетаниях попарно, путем подачи в зоне контакта двух материалов проволочного филамента градиентно, постепенно увеличивая подачу одной проволоки и уменьшая подачу другой. Таким методом получали материал с широким градиентом структуры и свойств. После получения материалов их исследовали методами оптической и растровой микроскопии, и проводили механические испытания.

Проведенные структурные исследования и механические испытания показывают, что формирование интерметаллидных фаз в граничных градиентных слоях приводит к образованию хрупкой, слабо подверженной сопротивлению внешнему воздействию структуры. Такие структуры в основном формируются при соединении стали 12Х18Н9Т и титанового сплава ВТ6. Но, интерметаллидные фазы, образующиеся в системе железо-титан, по литературным источникам, широко применяются для изготовления деталей триботехнического назначения, в основном, по причине высокой твердости. По этой причине, несмотря на снижение механических свойств интерметаллидных фаз системы "железо-титан", данное явление может быть использовано и с положительной стороны.

Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ

Ю.А. ЧУМАКОВ, Т.А. КРЫЛОВА

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Email: chya@ispms.ru

Известно, что после 4-8 циклов использования медные стенки кристаллизаторов, используемых в узлах машин непрерывного литья заготовок, после механической обработки утилизируют. Подобная проблема возникает и при производстве чугуна, поскольку происходит износ медных головок кислородных фурм конвертера, стойкость которых составляет от 50 до 150 плавов.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эксплуатационной стойкости медных изделий металлургических оборудования является применение технологии электронно-лучевой наплавки в вакууме с целью нанесения упрочняющих покрытий на их поверхность [1]. Экспериментальные исследования [1] показали, что в зоне взаимодействия электронного пучка с поверхностью катализатора образуется область избыточного давления 3-5 атмосфер, в этом случае часть наплавляемого порошка не попадает в ванну расплава и отбрасывается в сторону потоком частиц меди, испаряющихся с поверхности ванны расплава, снижая коэффициент использования наплавляемого материала. Для оптимизации технологии авторами было использована комплексная подход, включающий в себя газопламенное нанесение покрытия с последующим оплавлением электронным пучком. В настоящей работе предложена и теоретически исследована модель процесса нанесения упрочняющего покрытия на поверхность медной пластины кристаллизатора методом вакуумной электронно-лучевой наплавкой.

Целью работы является поиска оптимальных режимов наплавки упрочняющих покрытий на основе тугоплавких карбидов на поверхность медной пластины кристаллизатора, которые позволят получить покрытия только электронно-лучевой технологией без предварительного напыления.

Математическая постановка задачи включает трехмерное уравнение теплопроводности граничные и начальные условия. Поскольку электронно-лучевая обработка пластины происходит в вакууме, в модели пренебрегаем теплообменом с окружающей средой и учитываем потери тепла только вследствие теплового излучения.

В процессе прохождения луча по поверхности пластины происходит ее плавление и образование ванны расплава, что учитывается в модели через изменение теплоемкости в окрестности температуры плавления. Считаем, что частицы являются инертными, не плавятся в процессе воздействия электронного луча на ванну расплава, но увеличивают теплоемкость и уменьшают теплопроводности системы «TiC-Cu».

Задача решалась численно. В расчетах определяли поле температуры, ширину и время существования ванны расплава.

Поскольку минимальная ширина развертки, минимальный радиус, скорость и мощность пучка ограничены техническими характеристиками установки, то для образования ванны расплава на поверхности медной пластины, как показало теоретическое исследование модели (для параметров установки [1]), необходимо проводить наплавку с предварительным подогревом пластины. Расчеты показали, что время существования ванны расплава для непрогретой пластины ($T=25^{\circ}\text{C}$) после прохождения луча с мощностью 6 кВт составляет 0.2 с. Если же облучаемая медная пластина предварительно прогрета до 700°C , то время существования ванны расплава возрастает в 2.5 раза (до 0.5 с).

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020, проект № 23.2.2.

Список литературы

1. Белюк С.И., Самарцев В.П., Гальченко Н.К., Дампилон Б.В., Раскошный С.Ю., Колесникова К.А. Электронно-лучевая наплавка в черной металлургии // Физическая мезомеханика, 2006. – Спец. Выпуск. № 9. – С. 157-160.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПЛАВЛЯЕМОГО ПОРОШКА КАРБИДА БОРА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Л.В. ЧУЧКОВА, А.С. БЕЛОВ, Е.А. ЛОЖКИНА, О.Э. МАТЦ

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: L_Chuchkova@bk.ru

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных методов повышения триботехнических свойств различных конструкционных материалов является их обработка высококонцентрированными источниками нагрева. Модификация поверхности материалов лазером, плазмой или электронным лучом позволяет осуществлять термическую обработку, формируя закалочные структуры только в поверхностных слоях, что существенно снижает энергозатратность по сравнению с методами объемного упрочнения. Также, благодаря возможности нагрева до высоких температур и быстрому охлаждению, высококонцентрированные источники активно применяются для формирования покрытий, содержащих тугоплавкие твердые частицы, в том числе оксиды, нитриды, бориды и карбиды.

В данной работе в качестве источника нагрева применялся электронный луч, выведенный в воздушную атмосферу. Такая обработка стала возможной благодаря созданию ускорителя электронов типа ЭЛВ-6 учеными совместно с ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН в 80-х годах прошлого века [1].

Целью работы стало получение высокопрочных покрытий, сформированных на титановых пластинах ВТ1-0 и ВТ6 путем электронно-лучевой наплавки порошковой смеси карбида бора и титана с различными концентрациями, а также исследование свойств полученных покрытий.

Анализ фазового состава сформированных покрытий показал наличие фаз карбида титана, моноборида титана и α (α')-титана. Структурные исследования позволили выявить, что в независимости от основного материала все типы покрытий состоят из равномерно распределенных в титановой матрице частиц карбида титана округлой и дендритной морфологии, а также бориды титана форма кристаллов которого близка к гексагональной. Толщина всех упрочненных слоев не превышает 1,7 мм.

ДюрOMETрические исследования показали, что наплавка карбида бора на пластины из титанового сплава ВТ6 более эффективна нежели обработка основы из сплава ВТ1-0. Максимальный уровень микротвердости был зафиксирован при наплавке 30 вес. % порошка карбида бора и составил 5200 и 7400 МПа для титанового сплава ВТ1-0 и ВТ6 соответственно.

Испытания при трении в условиях воздействия закрепленных частиц абразива является одним из самых жестких видов изнашивания. Результаты износа показали, что образцы ВТ1-0 и ВТ6 с концентрацией карбида бора 30 вес. % в исходной порошковой смеси показала идентичные результаты стойкости к изнашиванию, которые в 2 раза выше в сравнении с материалом основы. Стоит отметить, что наплавка 10 и 20 вес. % карбида бора на основу ВТ6 позволила повысить износостойкость лишь в 1,2 и 1,6 раза, в то время как обработка основы из сплава ВТ1-0 привела к увеличению стойкости к изнашиванию в 1,65...1,75 раза.

В качестве выводов можно отметить следующее: наплавка 10...30 вес. % порошка карбида бора позволяет сформировать на поверхности основного материала (титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6) качественные слои толщиной до 1,7 мм, состоящие из карбидных и боридных частиц распределенных в α (α')-титановой матрице. Максимальный уровень микротвердости зафиксирован при наплавке 30 вес. % порошка карбида бора на пластину ВТ6 и составил 7400 МПа. Стойкость к изнашиванию при трении в условиях воздействия закрепленных абразивных частиц увеличился в 2 раза по сравнению с основным материалом для образцов с наплавкой 30 вес. % карбида бора.

Список литературы

1. Салимов Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – № 2. – С. 197-201.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ

Е.М. ШАМОВ, Н.Н. ЕВТИХИЕВ, И.Н. ШИГАНОВ, И.А. БЕГУНОВ

ООО НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», Московская обл., Фрязино
E-mail: eShamov@ntoire-polus.ru

Новая многопроходная технология лазерной сварки стыковых соединений труб – альтернатива дуговым способам, применяемым при строительстве магистральных газопроводов.

Анализ влияния параметров лазерной сварки на формирование геометрии расплава позволил разработать концептуально новую схему сварки неповоротных стыков труб, где площадь разделки под сварку уменьшается в 6 раз по сравнению со стандартной и в 3 раза по сравнению с самой прогрессивной дуговой технологией (рисунок 1).

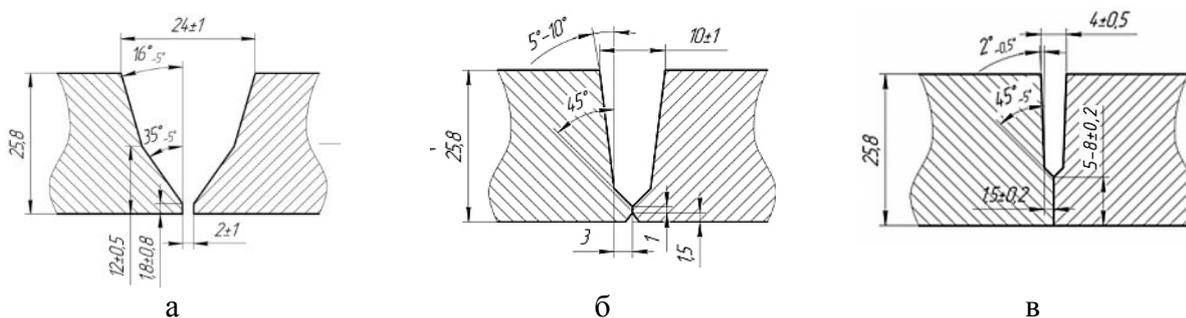


Рисунок 1 - Разделка кромок: а) под ручную дуговую сварку, б) под автоматическую дуговую сварку комплексами CRC-Evans, в) под лазерную многопроходную сварку

Используя только один сварочный источник - лазерный луч, можно получать сварные соединения на трубах класса прочности К60 с качественным корневым проплавлением, плотным заполнением узкой разделки и усилением на поверхности. Макроструктура такого шва представлена на рисунке 2.

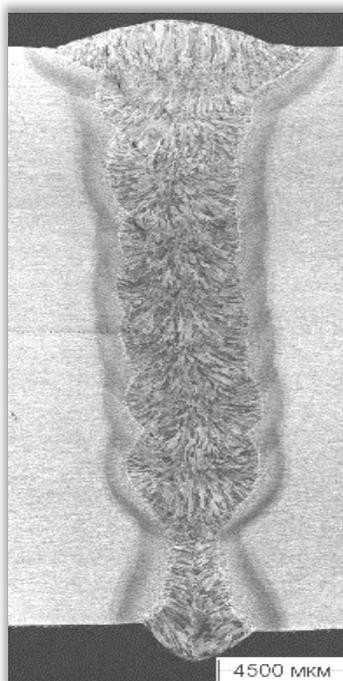


Рисунок 2 - Макрошлиф сварного соединения, толщина 25,8 мм

Возможность применения лазерной технологии в производственных условиях подтверждена результатами неразрушающего контроля, механических испытаний, макро- и микроструктурных исследований.

Список литературы

1. Гок С., Гюменюк А., Ламмерс М., Ретмайер М. Особенности процесса орбитальной лазерно-дуговой сварки толстостенных труб большого диаметра // Автоматическая сварка. – 2010. – № 9.
2. Ушаков А.Б., Морозова О.П., Бегунов И.А., Шамов Е.М., Орешкин А.А., Вышемирский Е.М. Технология лазерной сварки магистральных трубопроводов // Газовая промышленность. – 2017. – Спец. № 2. – С. 100-107.
3. Шамов Е.М., Бегунов И.А., Васильев А.А., Шелестова А.К., Иванисов Д.В., Орешкин А.А., Мишин М.А. Лазерная сварка толстостенных стальных труб в потолочном положении // Сварочное производство. – 2018. – № 8. – С.16-22.
4. Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю., Деркач А.П., Шамов Е.М., Бегунов И.А., Горский А.И. Особенности формирования структуры и механических свойств при лазерной сварке неповоротных стыков труб // Сварочное производство – 2018. – № 10. – С. 18-24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ПЛАСТИН ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНОЙ ВСТАВКИ

В.П. ШАПЕЕВ^{1,2}, А.Н. ЧЕРЕПАНОВ¹, В.И. ИСАЕВ¹

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, г. Новосибирск

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

E-mail: shapeev.vasily@mail.ru

Предложены численные 3D модели для расчета процесса лазерной сварки встык пластин из разнородных металлов с использованием композитных вставок, полученных сваркой взрывом тонких слоев из разнородных металлов. Существенным обстоятельством разрабатываемой и моделируемой технологии является то, что сварка взрывом дает прочные соединения разнородных металлов с хорошим качеством сварочных швов и позволяет получить достаточно прочные композитные вставки. Предложено такую технологию применять для сварки пластин из металлов, сварка которых непосредственно друг с другом представляет определенные технологические трудности. Проведено численное моделирование двух случаев сварки. В первом случае моделируется сварка пластин из сплавов стали и титана, во втором случае - пластин из сплавов алюминия и титана. В первом случае использована вставка из слоев стали, меди, ниобия и титана. Во втором - использована вставка из слоев алюминия и титана. В обоих случаях применение промежуточной вставки между свариваемыми металлами предназначено для того, чтобы предотвратить их перемешивание в сварочной ванне и образование хрупких интерметаллидов в сварном шве. Их наличие отрицательно влияет на прочность сварочного шва и всей сваренной конструкции. Расчеты по предложенным моделям позволяют подобрать величины толщин слоев в промежуточной вставке, мощности лазерного излучения и скорости сварки, при которых достигается «кинжальное» проплавление свариваемых стыков. Кроме того, при рассчитанном режиме сварки в сварочных ваннах не происходит смешивание металлов, приводящее к образованию интерметаллидов. И наконец, в процессе сварки устанавливается такое распределение температуры в изделии, при котором не происходит разрушение сварных швов во вставке, полученной сваркой взрывом.

Проведено численное моделирование обоих указанных случаев сварки пластин из разнородных металлов и получено удовлетворительное согласие результатов расчетов и физического эксперимента.

Исследование проводилось при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-08-00571.

Список литературы

1. Исаев В.И., Шапеев В.П., Черепанов А.Н. Численное моделирование лазерной сварки тонких металлических пластин с учетом конвекции в сварочной ванне // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – № 3. – С. 451-466.
2. Cherepanov A.N., Orishich A.M., Pugacheva N.B., Shapeev V.P. Investigation of the structure and properties of titanium-stainless steel permanent joints obtained by laser welding with the use of intermediate inserts and nanopowders // Thermophysics and Aeromechanics. – 2015. – Vol. 22. – No. 2. – P. 135-142. DOI: 10.1134/S0869864315020018. WoS: [000356379100001].
3. V. Isaev, A. Cherepanov, V. Shapeev. Numerical study of Heat Modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert. Int. J. of Heat and Mass Transfer 99, 711–720 (2016). DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.019, WoS: [000384779300068].

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ БЕЗ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Р.А. ШЕВЧЕНКО, Н.А. КОЗЫРЕВ, С.Н. КРАТЬКО, Р.Е. КРЮКОВ, А.Р. МИХНО

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк
E-mail: shefn1200@mail.ru

Бесстыковой путь – наиболее прогрессивная конструкция верхнего строения пути, главным преимуществом которого является возможность практически полной ликвидации стыков, что значительно уменьшает динамические силы и снижает сопротивление движению поездов. В РФ производство рельсовых плетей для бесстыкового пути осуществляют электроконтактным способом сварки. Выход из строя сварного стыка рельсов ведет к большим экономическим потерям. За 2016 год 30,9 % изломов рельсов произошло по причине излома по сварному стыку, изъято 14,8 % остродефектных рельсов из-за дефектов сварки и 17,7 % дефектных рельсов так же из-за дефектов сварки.

При электроконтактной сварке рельсов, так же, как и при остальных видах сварки производится нагрев и последующее охлаждение металла в зоне термического влияния (ЗТВ). Ускоренный нагрев в зоне сварного соединения и дальнейшее быстрое охлаждение ЗТВ в локальных участках с увеличенным содержанием таких легирующих элементов, как хром, никель и углерод, приводит к образованию недопустимой структуры мартенсита. Это служит причиной получения дефектов в металле сварного соединения (усталостные трещины в головке, шейке и подошве рельса и последующий хрупкий изломом). Для исключения дефектов производят локальную индукционную термообработку - сварной стык нагревают до аустенитного состояния и производят выдержку. Далее производят закалку головки рельса с помощью сжатого воздуха и нормализацию шейки и подошвы рельса. Так же данному способу термической обработки присущи следующие недостатки: появление новых зон термического влияния, одностороннее охлаждение, недостаточная глубина прогрева при термической обработке, дополнительные затраты на оборудование и обслуживающий персонал.

В условиях СибГИУ разработан способ [1], позволяющий исключить дополнительную термообработку сварного соединения рельсов. Сущность способа заключается в том, что после осадки и охлаждения сварного стыка в момент достижения необходимой температуры, производится изотермическая выдержка путем пропускания импульсов переменного электрического тока через сварной стык с помощью рельсосварочной машины. Время выдержки определяется инкубационным периодом образования необходимой структуры и регулируется количеством импульсов тока. Преимущества способа: в 2 раза снижается зона с пониженной твердостью сварного соединения в сравнении со стыками после термообработки, что увеличивает эксплуатационную стойкость рельсов; снижается себестоимость производства длинномерных рельсовых плетей на 12 %; увеличивается производительность труда на 10 %.

Список литературы

1. Пат. 2641586 РФ, МПК В 23 К 11/04. Способ контактной стыковой сварки рельсов / Е.В. Протопопов, Н.А. Козырев, Р.А. Шевченко, Р.Е. Крюков, С.В. Фейлер, А.А. Усольцев // Заявл. 07.12.2016; опубл. 18.01.18. Бюл. № 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ю.Ю. ЭМУРЛАЕВА

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск
E-mail: emurlaeva@corp.nstu.ru

Сварка взрывом обеспечивает бездефектное предварительное соединение разнородных металлов. Формирование высококачественного соединения по технологии сварки взрывом требует выбора оптимальных режимов, угла удара и скорости столкновения свариваемых поверхностей, регулируемой типом и количеством взрывчатого вещества [1]. Целью исследования было изучение влияния геометрии съёмки и тепловых процессов на качество сварного соединения. Одной из задач исследования является определение зоны оптимальных режимов сварки взрывом с помощью классических и численных подходов. В последнее время все больше исследователей склонны к численному изучению сварки взрывом, определяя роль моделирования в альтернативных способах изучения высокоскоростного процесса. Вторая задача исследования – разработка комплекса надежных численных методов для моделирования всего процесса сварки взрывом с воспроизведением физических явлений, таких как волнообразование и струеобразование, характеризующих качество сварного соединения. Процесс соединения металлов при сварке взрывом сопровождается локальным повышением температуры в околошовной зоне, которая, как и при любом другом способе сварки, может оказывать влияние на структуру и свойства получаемых соединений. Таким образом, заключительная задача - полное и точное решение тепловой задачи, позволяющей уже на стадии разработки технологии получения металлических композитов прогнозировать тепловую ситуацию в околошовной зоне и минимизировать вероятность получения нежелательных фаз и дефектов в сварном шве.

В проведенном исследовании рассматривались как классические подходы, основанные на определении так называемого «окна свариваемости» с применением моделей, разработанных в работах Уитмана, Дерибаса, Лысака и других, так и методы численного моделирования. Для воспроизведения эффектов, протекающих во время процесса сварки взрывом, был выбран бессеточный лагранжевый метод гидродинамики сглаженных частиц, позволяющий моделировать задачи с большими деформациями и быстро движущимися границами. Для решения задачи была выбрана среда Ansys Autodyn, модифицированное уравнение состояния Ми — Грюнайзена и модель Джонсона-Кука.

В данной работе детально рассмотрен расчет границ окна свариваемости для оптимального выбора режимов сварки взрывом. Воспроизведение расчетов для любой пары материалов позволит предсказать комбинацию взрывчатого вещества и угла столкновения и скорректировать работу экспериментальных установок.

Комплекс выбранных методов и моделей позволил воспроизвести морфологию границы сварного соединения. Результаты, полученные численными методами моделирования, согласуются с классическими подходами. Таким образом, выбранные модели и методы отвечают всем требованиям исследования, позволяют предугадать успешный режим сварки взрывом, а также решать тепловые задачи исследователей.

Очевидно, что использование режимов сварки выше верхней границы окна свариваемости приводит к разрушению образовавшегося соединения из-за большого выделения тепла на границе раздела пластин и появлению растягивающих напряжений до кристаллизации материала. Время существования в шве положительных давлений было зафиксировано с помощью методов численного моделирования. Время кристаллизации границы сплавляемых пластин было получено с помощью решения двумерной тепловой задачи для зоны шва. Их сравнение позволило уточнить верхнюю область границы окна свариваемости и предсказать дефекты, образовавшиеся при кристаллизации расплава.

Также были рассчитаны поля температуры в неподвижной пластине и динамика их выравнивания во времени. Можно выделить источники тепла, непосредственно влияющие на температурные условия образования сварного соединения: нагрев соударяемых

поверхностей потоком ударно-сжатого газа впереди точки контакта, нагрев метаемой пластины продуктами детонации взрывчатого вещества, выделение теплоты в околошовной зоне в результате пластической деформации металла.

Список литературы

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 207 с.

Контактная информация:

Тел.: (3822) 286-833, факс: (3822) 492-576

E-mail: mv_perovskaya@inbox.ru; wr2019@ispms.tsc.ru

Адрес для переписки:

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4