

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ МОНТАЖНЫХ ШВОВ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е. А. Иванайский, А. А. Иванайский, М. Н. Сейдулов

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

К сварным соединениям мостовых конструкций из сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА, работающим при отрицательных температурах, предъявляются повышенные требования по комплексу механических свойств. Очевидно, что разработка новой технологии сварки сталей этого класса возможна только с использованием современных прогрессивных методов компьютерного моделирования, однако необходимым и обязательным условием остается практическая апробация в производственных условиях. Поэтому математическое моделирование обязательно должно подтверждаться экспериментальными исследованиями. На кафедре «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ им. И. И. Ползунова под руководством профессора Д. П. Чепрасова был разработан инженерный программный комплекс (ИПК) по оценке и прогнозированию механических свойств сварных соединений на основе сбора и обработки экспериментальной информации и компьютерного моделирования.

При оценке качества сварных соединений наиболее значимыми показателями являются ударная вязкость и сопротивление хрупкому разрушению металла шва и околошовной зоны (ОШЗ). Они позволяют оценить возможность зарождения и распространения очагов замедленного разрушения, ведущих к образованию недопустимых дефектов – холодных трещин. Показатели ударной вязкости напрямую зависят от структуры металла ОШЗ и условий ее формирования под действием термомодеформационных циклов сварки (ТДЦС).

Одним из примеров практического внедрения предложенного ИПК с использованием в качестве модуля сбора данных измерителя-регулятора «ОВЕН ТРМ 202 v2.025» является оптимизация параметров режима автоматической сварки под флюсом монтажных швов мостового перехода через р. Катунь у с. Ая республики Алтай.

Металл шва и ОШЗ сварного соединения стали 10ХСНДА и 15ХСНДА обладает необходимыми прочностными и пластическими свой-

ствами, которые находятся на уровне свойств основного металла. Вместе с тем сварные соединения стали 15ХСНДА толщиной 14 мм, полученные односторонней двухпроходной автоматической сваркой под флюсом, оказались чувствительными к низкотемпературному охрупчиванию, особенно по линии сплавления. Причиной снижения ударной вязкости явились локальные искажения решетки феррита, сегрегация фосфора в зону сплавления, а так же формирование видманштеттовой структуры металла шва и ОШЗ.

Исследования проводили на стали 15ХСНДА следующего химического состава, %: 0,14 С, 0,89 Si, 0,43 Mn, 0,42 Cr, 0,25 Ni, 0,41 Cu, 0,1 V, 0,015 S, 0,012 P. Автоматическую сварку под флюсом АН-47 на медных подкладках выполняли в щелевую разделку за два прохода сварочной проволокой Св-10НМА диаметром 4 мм с помощью сварочного автомата МZ-ZK совместно с выпрямителем АSAW-1000-II. Сварка первого валика проводилась с металлхимической присадкой (МХП). Термические циклы регистрировались хромель-алюмелевыми термопарами типа ТХА/1-0001 диаметром 0,24 мм. С целью повышения ударной вязкости по линии сплавления при -60 °С проводилась оптимизация режимов автоматической сварки под флюсом, включая физическое и математическое моделирование, в том числе с использованием регрессионного анализа, а также выбор способа подготовки кромок под сварку.

Для управления модулем сбора данных и регистрации изменения температуры точки тела изделия (образца) во времени применялась программа «Среда моделирования автоматической сварки (AWS)», позволяющая решать целый ряд технологических задач: 1) расчет термического цикла в заданной точке ОШЗ; 2) построение температурного поля предельного состояния; 3) расчет прочностных характеристик металла шва; 4) выбор сварочных материалов (в том числе сочетания флюса и проволоки), рекомендованных для используемой марки стали в соответст-

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ МОНТАЖНЫХ ШВОВ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

вии с ГОСТ и личными предпочтениями; 5) построение расчетной схемы термического цикла на основании данных, полученных из физического эксперимента. Все эти функции интегрируются в одну самую важную – поиск оптимальных входных параметров автоматической сварки применяемых сталей для получения ожидаемых характеристик структур металла в шве и ОШЗ, необходимых для предотвращения зарождения очагов замедленного разрушения.

Программный продукт генерирует запрос в единицу времени. Аналого-цифровой преобразователь по этому запросу выдает текущее значение измеряемых величин. Таким образом, удается получить график изменения температуры точки тела изделия (образца) в зависимости от времени и расстояния от источника нагрева. Кроме того, с помощью программы «AWS» производили компьютерное моделирование процессов автоматической сварки под флюсом с применением расчетной схемы «мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине» с целью отыскания оптимальных параметров режима (рисунок 1). Предлагаемый ИПК позволил не только автоматизировать процесс расчета механических свойств металла шва и ОШЗ, но и осуществить их оценку и прогнозирование, как на основе прямого сбора и обработки экспериментальных данных, так и на базе математического моделирования.

Установлено, что наибольшим сопротивлением хрупкому разрушению основного металла и ОШЗ обладает сталь 3-й категории после закалки и высокого отпуска. Проведенные однофакторные эксперименты показали, что основными технологическими факторами, влияющими на ударную вязкость (Y), является погонная энергия сварки (q_n), а также концентрация никеля и р. з. м. (церия) в металле шва. Задачу оптимизации параметров термического цикла сварки решали с помощью одного из методов планирования эксперимента – центрального композиционного рототабельного плана (таблица 1).

Верхний и нижний уровень погонной энергии обеспечивали качественное формирование сварного шва за один и два прохода соответственно. Верхний уровень церия в наплавленном металле обеспечивает образование однородного соединения без пор, которые в ответственной конструкции являются недопустимым дефектом. Нижний уровень никеля ограничен его переносом из основного металла, а верхний уровень обусловлен как его дороговизной, так и возмож-

ностью образования закалочных структур, и, следовательно, снижения пластичности сварного соединения. Следует отметить, что указанные концентрации легирующих элементов определялись аналитически, без учета потерь на угар. Обработка экспериментальных данных (проверка однородности оценок дисперсий, получение математической модели объекта, и проверка ее адекватности) соответствовали известным зависимостям рассматриваемого метода планирования эксперимента.

Таблица 1 – Уровни факторов в кодовом и натуральном обозначении

Исследуемые факторы (кодированное обозначение)	Натуральные значения (кодированные значения)				
	-1	0	1	2	3
Погонная энергия (X_1), Дж/см	21420	36425	51450	-	-
Концентрация никеля (X_2), %	0,2	1,2	2,2	3,2	4,2
Концентрация р.з.м. (X_3), %	0	0,15	0,3	0,45	0,6

Была построена регрессионная математическая модель зависимости ударной вязкости от основных технологических параметров сварки:

$$Y = 23,3 + 5,34Ni + 158,6Ce - 7,65 \times 10^{-3} q_n^2 - 0,01q_nCe + 26,72CeNi - 0,0018q_nCeNi.$$

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на повышение ударной вязкости оказывает церий. Церий, являющийся активным десульфатором, уменьшает количество сульфидной эвтектики ванадия и переводит ее из пленочной (по поверхности зерен), в глобулярную (в виде отдельных включений или цепочек включений). Тугоплавкие частицы оксида церия при этом служат дополнительными центрами кристаллизации. Кроме того, церий уменьшает твердость, и как следствие, увеличивает пластичность стали. Никель, вытесняя углерод из α -кристаллической решетки, способствует уменьшению количества феррита в металле шва. Знак «-» говорит о необходимости снижения погонной энергии для получения более высоких значений ударной вязкости. Получение отрицательных эффектов взаимодействия показывает, что увеличение концентрации легирующих элементов не может компенсировать повышение погонной энергии.

Поиск оптимума производили методом крутого восхождения. Наибольшие значения ударной вязкости достигаются при двухпроходной сварке на пониженной погонной энергии с концентрацией никеля от 3,0 до 3,5 % и церия от 0,3 до 0,4 %.

Форма разделки кромок и количество проходов при сварке оказывает значительное влияние на микроструктуру, и как следствие, на ударную вязкость сварного соединения. Однако, математическое описание данных факторов затруднительно, поэтому с целью оценки их влияния на хладостойкость сварного соединения были проведены полные факторные эксперименты типа 2^2 . Образцы с различной разделкой сваривались на минимальной, а с различным количеством проходов – на максимальной погонной энергии. Так, например, сварное соединение, выполненное на оптимальных параметрах режима в щелевую разделку, имеет ударную вязкость от 10 до 12 Дж/см² при сварке за один проход, от 16 до 20 Дж/см² – за два прохода и от 40 до 45 Дж/см² – за три прохода. Еще более значительное влияние на хладостойкость по линии сплавления оказывает разделка кромок. Ударная вязкость по линии сплавления соединения с щелевой разделкой составляет от 20 до 35 Дж/см², для V-образной – от 70 до 80 Дж/см², для V-образной, сваренной за три прохода, – от 95 до 100 Дж/см². Применение V-образной разделки кромок позволяет избежать таких

опасных дефектов в стыковых швах как продольные трещины в корневом проходе.

При многослойной сварке происходит отжиг нижележащих валиков, устраняется химическая неоднородность, уменьшаются остаточные напряжения. Увеличение значений ударной вязкости сварного соединения при V-образной разделке кромок объясняется более благоприятной формой шва, в этом случае разрушение происходит как по линии сплавления, так и по наплавленному металлу. Влияние других режимов сварки в проведенных экспериментах в целом соответствуют зависимостям, приведенным в уравнении.

Таким образом, установлено, что автоматическую сварку под флюсом сталей 10ХСНДА и 15ХСНДА необходимо вести на пониженной погонной энергии за несколько проходов, предпочтительно в V-образную разделку, а также с дополнительным легированием металла шва р. з. м. При этом, можно устранить низкотемпературное охрупчивание сварных соединений по линии сплавления. Используя ИПК по оценке и прогнозированию механических свойств сварных соединений на основе сбора и обработки экспериментальной информации и компьютерного моделирования, был обоснованно подтвержден выбор параметров режима автоматической сварки под флюсом. Предложенная технология выполнения монтажных швов из стали 15ХСНДА обеспечивает получение соединения со свойствами, не ниже требуемых ГОСТ 6713-91.

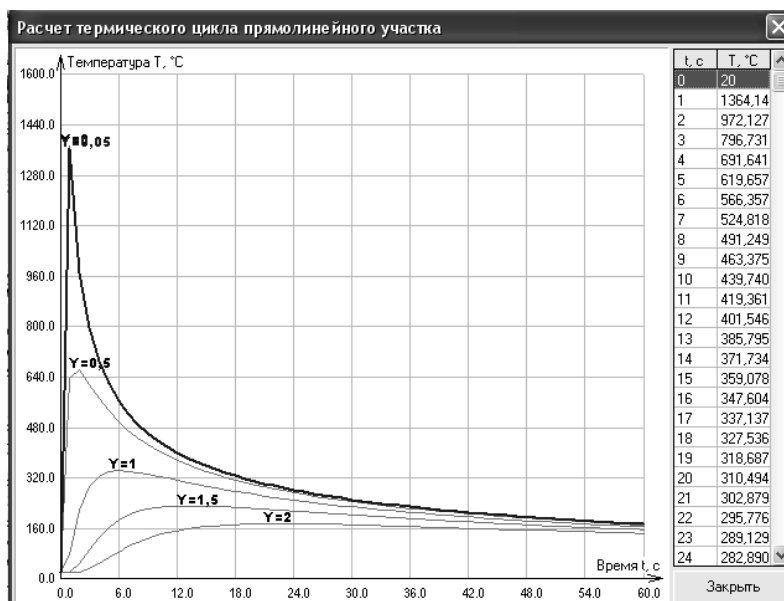


Рисунок 1 – Расчетные кривые термических циклов сварки, построенные в программе «AWS»