

УДК 621.791.753.5 + 621.791.05

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СВАРКИ ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ФЛЮСОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПО «МАТКАД»

В.С. Рыбин, Ю.В. Безганс

Разработана модель сварки под флюсом на базе ПО «Маткад», позволяющая выполнять расчет режимов по ранее опубликованным методикам, предназначенным для графоаналитического расчета. Для оценки влияния геометрии шва на режимы сварки в оперативном порядке определены зависимости площади наплавки от типа сварного соединения и толщины изделия для стыковых сварных соединений по ГОСТ 8713. Используемая расчетная схема предусматривает возможность ее распространения на иные методы сварки оплавлением путем дополнения соответствующими расчетными схемами, в частности, при моделировании и расчете режимов по заданным геометрическим параметрам швов для сварки в среде защитных газов, для сварки открытой дугой, для процессов одно- и двухдуговой сварки стыковых и тавровых соединений, для нагрева и охлаждения изделия и т.п.

Ключевые слова: сварка под флюсом, площадь наплавки, тип сварного соединения, толщина изделия, модель расчета режимов для ПК, Маткад.

В связи с широким применением вычислительной техники при разработке и управлении технологическими процессами, а также при выполнении научно-исследовательских работ появилась настоятельная необходимость в разработке математических моделей технологии сварки, методик расчета параметров режима, количественной оценке термических деформаций и пр.

В настоящее время известны методики расчетов режимов сварки плавлением [1, 2, 3, 4], однако они в основном построены на эмпирических формулах и диаграммах, что затрудняет разработку универсальной схемы расчета, позволяющей использовать современные компьютеры для оптимизации режимов сварки в условиях многообразия требований, предъявляемых к сварным соединениям. Помимо указанных недостатков существующими методиками предусмотрена необходимость сравнения получаемых промежуточных результатов с допускаемыми граничными значениями и принятия корректирующих решений.

Коммерческие программы вследствие скрытого алгоритма вычислений имеют ограниченные рамки применения и используются, главным образом, сотрудниками проектных организаций для укрупненной оценки энергетических и материальных затрат. Скрытый и однозначно заданный алгоритм не позволяет использовать коммерческие программы для моделирования сварочных процессов и оптимизации режимов сварки.

Широко распространенный вариант графоаналитического расчета режимов сварки предусматривает следующие шаги:

- оценочное определение площади наплавки в зависимости от толщины изделия и выбранного типа сварного соединения;
- определение скорости сварки из уравнения материального баланса между расплавленным и наплавленным металлом;
- определение погонной энергии, затраченной на выполнение сварного шва;
- определение глубины провара, ширины шва и высоты валика.

Однако после определения расчетных значений ширины шва и высоты валика выясняется, что они отличаются от ранее принятых значений, и потому площадь наплавленного металла не соответствует значению, принятому при вычислении скорости сварки, что ведет к нарушению материального баланса и, соответственно, конфликту промежуточных результатов вычислений. Расхождение обычно превышает допустимые 5...7 %, при этом повторные вычисления формального характера не всегда приводят к уменьшению расхождения и, как правило, требуют принятия логических решений.

Целью работы является на основании опубликованных ранее результатах исследований и методик разработать универсальную расчетную модель режимов сварки применительно к сварке под флюсом, исключая возникновение конфликта промежуточных результатов. Универсальность расчетной модели предусматривает возможность ее распространения на иные методы сварки оплавлением путем дополнения соответствующими расчетными схемами.

Геометрические характеристики сварного шва в полной мере оцениваются глубиной провара, шириной шва и высотой валика. Перечисленные показатели позволяют определить площади наплавленного и расплавленного металла, размеры которых существенно зависят [5] от количества теплоты, выделяемой дугой, и условий ввода этого тепла в изделие.

Из перечисленных выше конструктивных параметров сварного шва глубина провара однозначно задается конструкторской документацией, и потому принята в расчетной схеме задаваемой величиной. Значения ширины шва и высоты валика могут быть скорректированы в ходе расчета с учетом выбранного типа сварного соединения, вводимых ограничений на мгновенную скорость охлаждения или по иным причинам, что позволяет отнести их к группе расчетных параметров.

Основными параметрами режима автоматической сварки под флюсом, оказывающими влияние на размеры и форму шва, являются: диаметр электрода, сварочный ток или плотность тока в электроде, род и полярность тока, напряжение на дуге, скорость сварки. Из технологических параметров к задаваемым следует отнести диаметр электрода (электродной прово-

локи), что обусловлено дискретным характером его номенклатурных значений по ГОСТ 2246. Значения сварочного тока и скорости сварки могут достаточно легко корректироваться при настройке режима, поэтому их целесообразно отнести к группе расчетных технологических параметров.

Разработку универсальной схемы расчета режимов сварки оплавлением целесообразно выполнять с использованием широко распространенной программы «Маткад», что дает возможность видеть алгоритм расчета, поскольку он представлен в виде удобных для восприятия формул. ПО «Маткад» позволяет квалифицированному пользователю вносить изменения в алгоритм вычислений для адаптации расчета к разнообразным конкретным условиям. Для исключения конфликта промежуточных результатов расчет режимов предусмотрено выполнять в виде решения системы уравнений с использованием встроенного в «Маткад» алгоритма решения систем уравнений.

В качестве начальных присвоений величина сварочного тока определена из условия средней плотности тока из допустимого диапазона для выбранного диаметра электрода. Граничные значения плотности тока и соответствующие им граничные значения сварочного тока для ряда номинальных диаметров электродных проволок представлены в форме функциональных зависимостей, полученных интерполированием широко распространенных табличных значений [5].

Зависимые от значений сварочного тока и диаметра электрода напряжение на дуге и коэффициента формы провара определяются известными уравнениями согласно [5]:

$$U_d = 20 + [5 * I / (100 * d^{0,5})], \\ \Psi = k * (19 - 0,01 * I) * d * U / I,$$

где U_d , I , d – соответственно напряжение, сварочный ток и диаметр электрода,

ψ , k – соответственно коэффициенты провара и влияния рода и полярности тока на форму шва.

Величина коэффициента k , учитывающего влияние рода и полярности сварочного тока, определена по известным формулам согласно [5] в зависимости от величины тока и диаметра электрода.

Графоаналитическая методика расчета коэффициента наплавки для сварки под флюсом, предложенная в [5], является весьма приближенной и трудоемкой, а для сварки в среде активных газов методика его расчета вообще отсутствует. По этой причине величина коэффициента наплавки определена путем коррекции значения коэффициента расплавления электродного металла на величину потерь при переходе расплавляемой проволоки в сварной шов (для сварки под флюсом потери приняты на уровне 5...7 %).

Распространенная методика определения коэффициента расплавления основана на диаграмме, моделирующей функцию двух аргументов (диаметра электрода и величины сварочного тока), которая может быть использована исключительно для графоаналитического расчета. В литературе отсутствуют табличные и эмпирические зависимости, положенные в основу указанной диаграммы. Поэтому для использования указанных функциональных зависимостей в рассматриваемой расчетной схеме выполнена ее «оцифровка». Повышение точности вычислений коэффициента расплавления от диаметра электрода и значения сварочного тока достигнуто применением двухмерной сплайн-интерполяции.

В конечном итоге, система уравнений для расчета режима сварки включает четыре задаваемые параметра: глубина провара, диаметр электродной проволоки, род и полярность тока, тип сварного соединения по ГОСТ 8713 и четыре расчетных параметра: величина сварочного тока, скорость сварки, ширина шва, высота валика. Остальные параметры режима сварки являются зависимыми и могут быть определены по результатам решения системы уравнений.

Начальное присвоение скорости сварки выполнено из условия оптимального значения произведения сварочного тока на скорость сварки, являющегося условием удовлетворительного формирования сварного шва [5].

Значения напряжения на дуге, коэффициента расплавления электрода, коэффициента наплавки, коэффициента влияния рода и полярности тока, коэффициента провара и погонной энергии определены как функции двух переменных: диаметра электрода и величины тока с тем, чтобы в ходе промежуточных вычислений значения указанных параметров оставались корректными.

Система уравнений включает известные уравнения [5]:

$$h = 0,076 \left(\frac{U(d,I) I \eta}{V \Psi(d,I)} \cdot 0,01 \cdot 3600 \right)^{0,5}$$

$$b = h \Psi(d,I)$$

$$\Psi(d,I) = 2,2$$

где h , V , η – соответственно глубина провара, скорость сварки и коэффициент использования тепла при сварке под флюсом ($\eta = 0,85$),

α , $F_n(h)$, b, g – соответственно коэффициент и площадь наплавки без учета площади валика, ширина и высота усиления шва.

Последнее уравнение позволяет задать требуемый коэффициент формы провара в соответствии с конструктивно задаваемыми размерами сварного соединения. Для расширения области применения рассматриваемой модели в состав системы можно вводить уравнение ограничения мгновенной скорости охлаждения и др.

Площадь наплавленного металла в системе уравнений представлена в виде:

$$F = F_n(h) + 0,73 \cdot b \cdot g.$$

Она наряду с диаметром электрода, величиной сварочного тока и скоростью сварки относится к основным технологическим параметрам, влияющим на режим сварки. Однако из-за отсутствия в литературе функциональных зависимостей между толщиной металла и площадью наплавленного металла ее корректировка в оперативном режиме при моделировании режимов затруднена. Для сокращения трудозатрат при использовании предлагаемой расчетной модели по результатам обработки геометрических параметров всех стыковых сварных соединений по ГОСТ 8713 определены зависимости площади наплавленного металла от толщины изделия без учета площади сечения валика. Указанные зависимости определены методами математической статистики с учетом размерных допусков по их усредненным значениям.

Разделение площади наплавки на две составляющие (площадь сечения разделки с зазором и площадь валика) обусловлено тем, что с учетом значений ширины и высоты валика площадь наплавленного металла является функцией уже трех аргументов, что усложняет расчетную модель. Кроме того, значения ширины и высоты усиления шва зависят от режимных параметров сварки, что, в конечном итоге, существенно затрудняет алгоритм вычислений.

Указанные зависимости представлены на рис. 1 и в табл. 1. Анализ показывает, что параметры сечений разделки, подчиняются алгоритмам, использованным разработчиками ГОСТ, без существенных отклонений, и потому с удовлетворительной точностью аппроксимированы квадратичными, а в некоторых случаях, и линейными уравнениями.

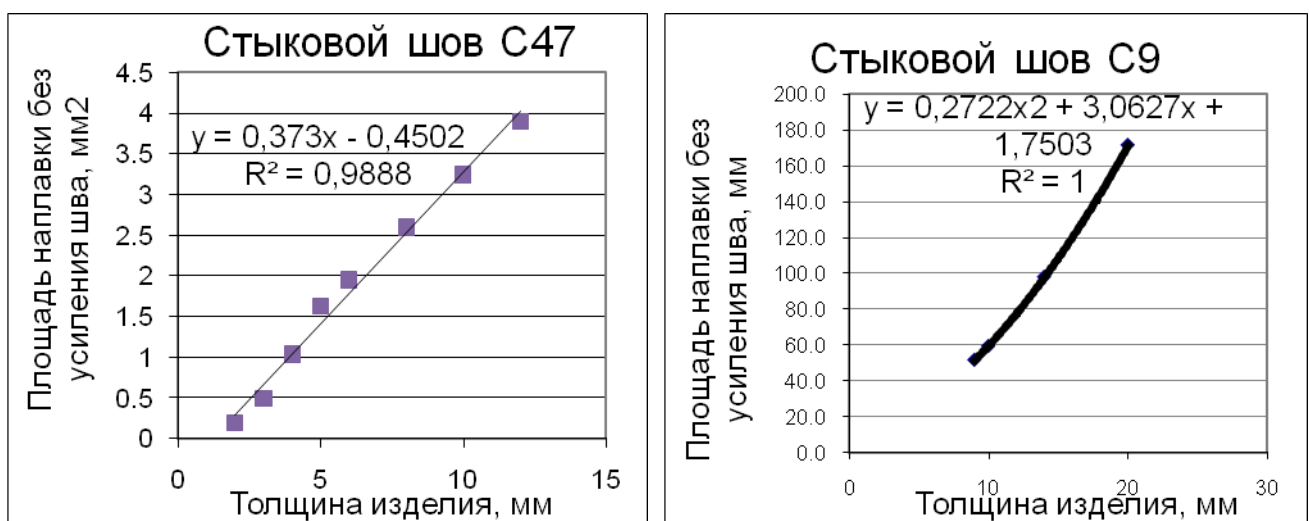


Рис. 1. Зависимость площади наплавки от толщины изделия для двух типов сварных соединений по ГОСТ 8713 (фрагмент)

Использование выявленных таким образом закономерностей между глубиной провара (толщиной изделия) и площадью наплавки позволяет в оперативном порядке выполнять расчет режимов сварки для различных типов сварных соединений и оценить их влияние на параметры тепловых процессов в изделии.

Таблица 1

Зависимости площади наплавленного металла (без учета площади сечения усиления шва) от типа стыкового сварного соединения и толщины основного металла (фрагмент)

Тип сварного соединения	Уравнение	Коэффициент корреляции
C47	$F_{C47} = 0,373 * s + 0,4502$	0,988
C4	$F_{C4} = 0,0381 * s^2 + 2,0149 * s - 3,5925$	0,982
C34	$F_{C34} = 0,1799 * s^2 + 14,446 * s + 98,098$	0,998
C9	$F_{C9} = 0,2722 * s^2 + 3,0627 * s + 1,7503$	1

Расчеты выполняются в следующем порядке:

- запустить программу на ПК;
- задать глубину провара;
- задать диаметр электродной проволоки;
- с помощью ключей встроенных панелей управления задать род и полярность тока;
- с помощью ключей встроенных панелей управления задать типа сварного соединения по ГОСТ 8713;
- пуск.

Результаты вычислений выводятся в виде матрицы или таблицы, в которой сведены все параметры сварного соединения и режима сварки, а также все дополнительные показатели (рис. 2), которые могут быть использованы для оценки материальных и энергетических затрат.

	0	1	2	3	4	5	6
0	"h, мм"	"b, мм"	"g, мм"	"F, мм ² "	Коэфф провара"	коэфф усиления"	"Толщина, мм"
1	8	17.6	1.82	38.41	2.2	9.64	
2	"d, мм"	"I, А"	"Макс I, А"	"Мин I, А"	"U, В"	"V, м/ч"	"q, Дж/мм ² "
3	4	800	756.19	442.75	40	37.81	1944
4	"КПД"	"Потери"	"ар, г/(А*ч)"	"а, г/(А*ч)"	"k"	"Vпп, м/ч"	"j, А/мм ² "
5	0.8	0.05	15	14.25	1	121.71	63

Рис. 2. Таблица результатов вычислений для одного режима на дисплее ПК

Совокупность таблиц удобно использовать для анализа и оптимизации режимов сварки. Для корректировки режимов таблица результатов содер-

жит предельные значения сварочного тока, определяемые по условию максимально и минимально допустимой плотности тока для различных диаметров электрода. При выходе величины тока за предельные значения пользователь осуществляет корректировку путем изменения диаметра электрода или с меньшей эффективностью – путем изменения коэффициента формы провара. Если площадь наплавки превышает 60...80 мм², то схема позволяет использовать модель для расчета режима двухдуговой сварки и т.п. Имеется возможность изменения типа сварного соединения, а также изменения режима для корректировки формы усиления шва и других показателей.

Сопоставление расчетных режимных параметров с экспериментально полученными данными [6] указывает на их удовлетворительную сходимость и возможность использования представленной модели для практических расчетов с целью моделирования и оптимизации сварочных режимов.

Таблица 2

Сопоставление расчетных и экспериментально полученных данных

Параметры режима	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
	<i>экспер.</i> <i>расчет</i>	<i>экспер.</i> <i>расчет</i>	<i>экспер.</i> <i>расчет</i>	<i>экспер.</i> <i>расчет</i>
Диаметр электрода, мм	$\frac{5}{5}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{4}{4}$	$\frac{4}{4}$
Сварочный ток, А	$\frac{550...600}{545}$	$\frac{650...700}{613}$	$\frac{560...600}{547}$	$\frac{730...770}{700}$
Напряжение дуги, В	$\frac{34...36}{32,2}$	$\frac{32...36}{33,7}$	$\frac{35...36}{33,7}$	$\frac{38...41}{37,5}$
Скорость сварки, м/ч	$\frac{34...36}{36}$	$\frac{28...30}{23}$	$\frac{50...52}{45,5}$	$\frac{50...52}{34,7}$
Глубина провара, мм	$\frac{4,5}{4,5}$	$\frac{6,5}{6,5}$	$\frac{4,5}{4,5}$	$\frac{7}{7}$
Ширина шва, мм	$\frac{18}{18}$	$\frac{23}{23}$	$\frac{15}{15}$	$\frac{18}{18}$
Высота усиления шва, мм	$\frac{2,5}{1,6}$	$\frac{3,7}{2,2}$	$\frac{2,2}{1,4}$	$\frac{2,5}{1,9}$
Площадь наплавки, мм ²	$\frac{30}{27,5}$	$\frac{60}{48,4}$	$\frac{22}{21,9}$	$\frac{31}{36,6}$

Представленная расчетная модель может быть распространена на иные методы сварки оплавлением путем дополнения ее соответствующими расчетными схемами. В частности, планируется использование программы

для расчета режимов по заданным геометрическим параметрам швов для сварки в среде защитных газов, для сварки открытой дугой [7, 8], для процессов одно- и двухдуговой сварки стыковых и тавровых соединений, для нагрева и охлаждения изделия и т.п.

Библиографический список

1. Луценко, В.Т. Методика расчета размеров шва при сварке (наплавке) под флюсом / В.Т. Луценко // Сварочное производство. – 1974. – № 8. – С. 21–23.
2. Шраерман, М.Р. Номограммы для определения режимов сварки под флюсом стыковых соединений / М.Р. Шраерман // Сварочное производство. – 1981. – № 8. – С. 17–20.
3. Иванов, М.А. Теоретический подход к расчету режима трехдуговой сварки под флюсом стыкового соединения деталей тележки рельсового транспорта / М.А. Иванов, А.М. Уланов, Ю.В. Безганс // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 146–149.
4. Уланов, А.М. Современный подход к разработке технологических параметров сварки в производстве труб большого диаметра / А.М. Уланов, М.А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 19. – № 39. – С. 150–151.
5. Акулов, А.И. Технология и оборудование сварки плавлением. Уч. для вузов / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
6. Шраерман, М.Р. Номограммы для определения режимов сварки под флюсом стыковых соединений / М.Р. Шраерман. – Сварочное производство. – 1981. – № 8.
7. Норин, П.А. Технологические характеристики открытой сварочной дуги / П.А. Норин, А.Ю. Третьяков, А.М. Осипов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 12 (271), вып. 19. – С. 214–217.
8. Норин, П.А. Анодное падение напряжения / П.А. Норин, А.М. Осипов // Тематический сборник научных трудов «Прогрессивные технологии в машиностроении» / гл. ред. В.И. Гузеев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 184–187.

[К содержанию](#)