



КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Т. В. КОРОЛЕВА**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
И. Г. ЛАВРИНЕЦ, инж. (НПФ «Корба», г. Киев)

Представлена структура компьютерной системы, разработанной авторами для рационального выбора сварочных материалов применительно к электродуговой сварке конструкционных сталей. В основу системы положено математическое моделирование физико-металлургических явлений при дуговой сварке с использованием данных фирм-изготовителей сварочных материалов относительно химического состава наплавляемого металла, режимов и условий сварки, а также коэффициентов наплавки.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварное соединение, зона термического влияния, химический состав, микроструктура, механические свойства, сварочные материалы, компьютерное моделирование

Введение. Традиционно выбор рационального варианта сварочных материалов для дуговой сварки современных конструкционных сталей связан с достаточно большим количеством экспериментов, в ходе которых получают сравнительные результаты по целому ряду параметров: условиям формирования и химическому составу металла шва или зоне проплавления (ЗП), микроструктуре ЗП и зоны термического влияния (ЗТВ), склонности к образованию горячих и холодных трещин, стандартным механическим характеристикам (твердости, пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению или сужению, ударной вязкости) в различных участках сварного соединения, а также специальным функциональным свойствам (длительной прочности при соответствующих температурах, коррозионной стойкости и т. д.). Все это требует для конкретного основного материала проведения соответствующих испытаний каждого альтернативного варианта сварочных материалов и режимов сварки. Учитывая существующий большой ассортимент сварочных электродов, сплошных и порошковых проволок, флюсов, защитных газов для дуговой сварки конструкционных сталей, обоснованный выбор рационального варианта чисто экспериментальным путем требует либо большого опыта, либо многочисленных экспериментов.

Назначение системы и получаемая информация. Разработанная авторами статьи компьютерная система предназначена в значительной степени сократить указанный выше объем экспериментов путем использования средств математического моделирования и соответствующего информационного обеспечения с целью получения технической информации, необходимой для обоснованного выбора сварочных материалов, режима и условий дуговой сварки. В качестве исходной информации в системе

используются паспортные данные фирмы-изготовителя сварочных материалов относительно вариантов сварочных материалов, рекомендуемых для дуговой сварки данного типа конструкционной стали; режимов дуговой сварки; коэффициентов наплавки; химического состава наплавляемого металла. Эти данные вводятся в систему пользователем одновременно с указанием типа свариваемой конструкционной стали (основного материала) и ее химического состава. В обмен система выдает пользователю для каждого альтернативного варианта следующую информацию:

- размер и форму ЗП для корневого шва и последующих проходов (условия формирования сварного шва, риск прожога и пр.);
- химический состав металла ЗП;
- микроструктурный состав металла ЗП и ЗТВ;
- механические свойства (твердость, временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость (KCV) при температурах $-30...-70$ °С в ЗП и ЗТВ);
- риск образования горячих и холодных трещин.

Краткое описание системы. Работа с системой начинается с ввода данных об основном материале, для которого выбираются сварочные материалы для дуговой сварки. Система предлагает пользователю 12 групп конструкционных сталей, к одной из которых необходимо причислить свой основной материал (рис. 1). По желанию пользователь может ознакомиться более подробно с характеристиками сталей конкретной группы (рис. 2), примерами химического состава, теплофизическими свойствами и особенностями дуговой сварки. Если пользователя удовлетворяет выбранная группа, то он должен заполнить данные относительно химического состава используемой стали (рис. 2).

Следующий этап работы связан с конкретизацией данных относительно вида сварного соединения. Система предлагает пользователю несколько видов сварных соединений со стыковыми швами, а также тавровое соединение с угловым швом (рис. 3). Возможна одно- и многопроходная (сло-

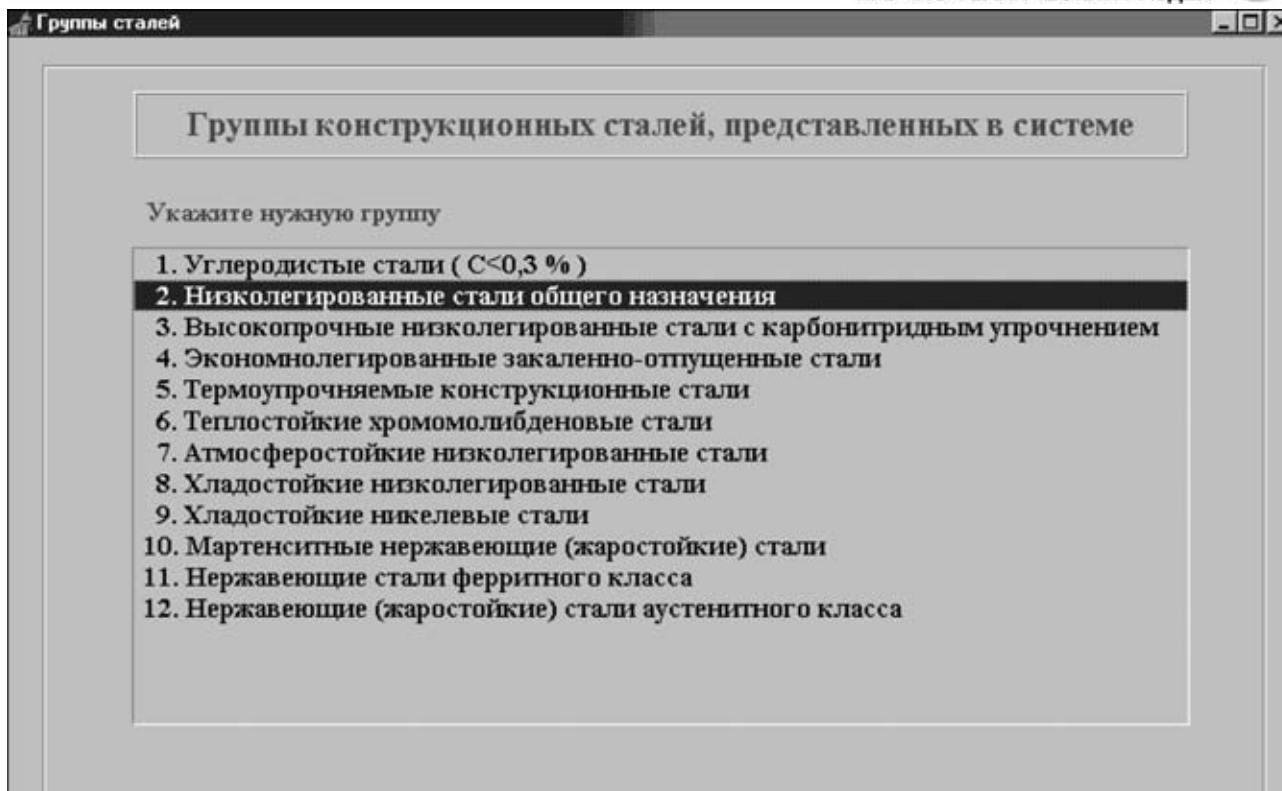


Рис. 1. Список групп конструкционных сталей, предлагаемых пользователю системой

ями либо «ниточными» швами) сварка. Количество проходов и раскладку валиков «ниточных» швов система выполняет самостоятельно. Возможен вариант только одного корневого шва. Во всех вариантах стыковых соединений (рис. 3) для кор-

невого шва при сварке на весу решается вопрос относительно риска прожога на основе оценки равновесия между силами, действующими на объем жидкого металла (поверхностное натяжение, давление дуги, гравитация).

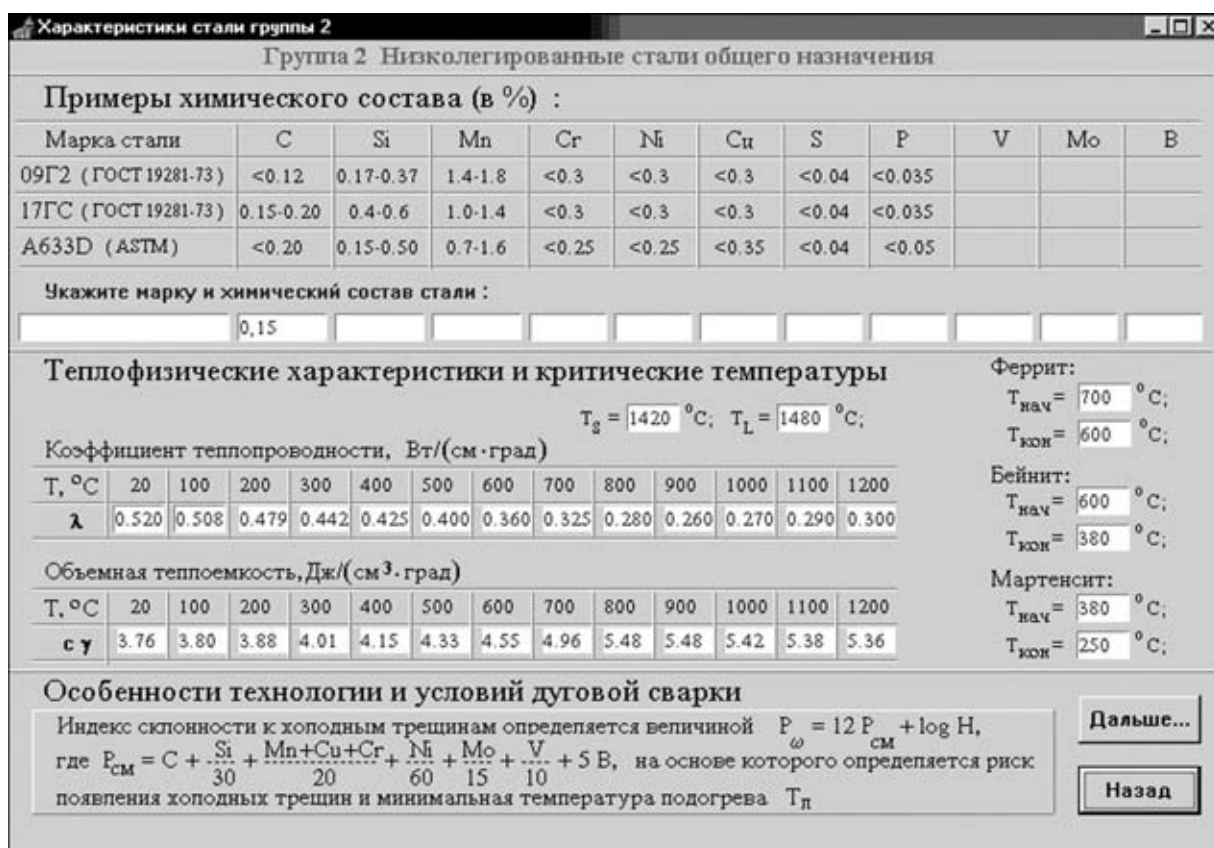


Рис. 2. Пример заполнения данных при выборе конкретной группы стали



Рис. 3. Виды сварных соединений, предлагаемых пользователю

Пользователь должен указать способ дуговой сварки (рис. 4), а также выбрать конкретные варианты сварочных материалов, заполнив соответствующие данные (тип указан на рис. 5) химического состава чисто наплавляемого металла, режимов сварки, коэффициента наплавки (по пас-

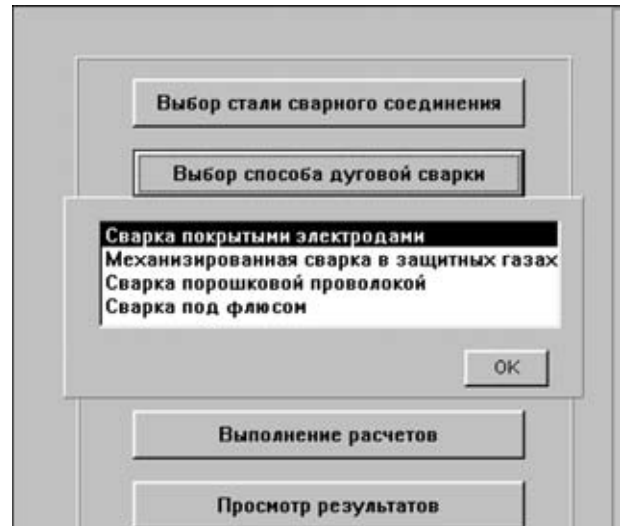


Рис. 4. Способы дуговой сварки, предлагаемые пользователю (портным данным фирмы-изготовителя, либо на основе имеющегося опыта).

С использованием введенных данных в системе выполняется комплекс операций, связанных с выбором скорости сварки на основе имеющихся ограничений относительно толщин отдельных слоев (либо поперечных сечений «ниточных» швов), затем рассчитываются температурные поля в поперечном сечении сварного шва для каждого прохода, начиная с корневого шва. Определяется поле максимальных температур, на основе которого оцениваются объемы, принадлежащие ЗП и ЗТВ. При этом используются исходные данные для основного материала относительно температур плавления $T_{пл}$ и $A_{с3}$ (см. рис. 2), а также соответствующие теплотехнические свойства.

Сварка покрытыми электродами

Марка сварочной проволоки Диаметр проволоки мм

	Корневой шов	Заполняющие слои	Декоративный слой
Режим сварки	$I_{св} = 90$ А; $U_{св} = 24$ В; $v_{св} = 0.3$ см/с;	$I_{св} = 180$ А; $U_{св} = 25$ В; $v_{св} = 0.4$ см/с;	$I_{св} = 145$ А; $U_{св} = 25$ В; $v_{св} = 0.11$ см/с;
Коэффициент наплавки	$\alpha_n = 9.5$ г/(А·ч)	$\alpha_n = 9.5$ г/(А·ч)	$\alpha_n = 9.5$ г/(А·ч)

Химический состав наплавляемого материала :

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	P	S
0.13	0.45	1.25					0.027	.0175
Co	N	V	Nb	W	Ti	Al	B	Fe

$T_g = 1420$ °C;
 $T_L = 1480$ °C;

OK

Рис. 5. Пример заполнения данных по режиму сварки и химическому составу наплавляемого материала

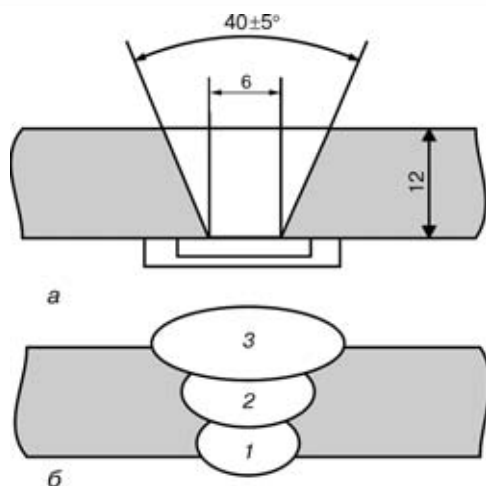


Рис. 6. Схема разделки (а) и заполнения слоев (б)

Для каждого прохода определяется средний химический состав металла ЗП на основе знания размеров и химического состава расплавляемых участков, а также количества и состава наплавляемого присадочного материала.

По химическому составу ЗП определяется принадлежность металла этой зоны к соответствующей группировке конструкционных сталей с позиций оценки микроструктурного состояния после охлаждения.

В системе имеются две группировки сталей (см. на рис. 1). К первой относятся конструкционные углеродистые и низколегированные стали (группы 1–8), микроструктура которых определяется на основе соответствующих диаграмм аннотермического распада аустенита. Вторая группировка конструкционных сталей охватывает легированные стали (группы 9–12), микроструктура которых определяется диаграммой Шеффлера (либо ее модификациями [1]). Для удобства в системе используются параметрические уравнения [2], позволяющие выполнять расчеты ожидаемой микроструктуры в каждой точке ЗП и ЗТВ на основе знания химического состава и параметров термического цикла. Принимается, что повторный нагрев выше A_{c3} способствует образованию новой микроструктуры на основе нового химического состава и новых параметров термического цикла. Повторный нагрев ниже A_{c3} не меняет микроструктуру, но способствует изменению механических свойств по механизму кратковременного отпуска.

Важным этапом работы системы является расчет механических свойств в различных точках ЗП и

ЗТВ. Он выполняется на основе знания микроструктур и химического состава. Для всех характеристик механических свойств $X = \{HV, \sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta_5, \psi\}$ используется представление

$$X = \sum_i x_i V_i \quad (i = a, f, p, b, m), \quad (1)$$

где a – аустенит; f – феррит; p – перлит; b – бейнит; m – мартенсит; V_i – массовая доля i -й микроструктуры в данной точке. Для x_i используются уравнения регрессии, связывающие эти величины с химическим составом сталей данной группы [2]. Для ударной вязкости по Шарпи (KCV) усредненное представление (1) не отражает особенности поведения материала для таких испытаний. Для этих целей в системе используются уравнения регрессии, связывающие KCV с химическим составом, $\Delta t_{8/5}$ и температурой испытания $T_{ис}$. Естественно, что коэффициенты регрессии такой зависимости могут достаточно существенно зависеть от группы конструкционной стали.

Важным элементом работы системы является оценка риска нарушения целостности металла ЗП либо ЗТВ за счет горячих и холодных трещин. Для высоколегированных сталей второй группировки наиболее реально говорить о риске образования горячих трещин. Склонность металла ЗП к горячим трещинам здесь оценивается по отношению $Cr^{экр}/Ni^{экр}$, где $Cr^{экр}$ – эквивалент хрома; $Ni^{экр}$ – эквивалент никеля, определяемые по химическому составу ЗП [1]. Склонность к холодным трещинам и рекомендуемые минимальные температуры подогрева для сталей групп 1–4, 7, 8 определяются индексом

$$P\omega = 12P_{см} + \log N \quad (2)$$

и степенью закрепления свариваемого узла, где $P_{см}$ – эквивалент углерода по [1]; N – содержание диффузионного водорода в ЗТВ. Для сталей групп 5, 6 минимальная температура подогрева указывается индивидуально.

Примеры применения. Рассмотрим два варианта сварки одностороннего стыкового соединения листов из судостроительной стали ДН32 (0,18С–1,3Мn–0,4Si–0,3Ni–0,01Al) толщиной 12 мм в нижнем положении на керамической подкладке (рис. 6, а); $P_{см} = 0,2633$. Предварительный подогрев не требуется при содержании диффузионного водорода менее $3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ при жестком закреплении и $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ в случае сварки в свободных условиях.

Таблица 1. Исходные данные для двух вариантов сварки соединения, изображенного на рис. 6, б

№ варианта	Марка проволоки и химический состав наплавляемого металла	Режим сварки											
		1-й проход			2-й проход			3-й проход			4-й проход		
		$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$	$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$	$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$	$I_{св}, \text{ А}$	$U_{св}, \text{ В}$	$v_{св}, \text{ см}^3/\text{с}$
1	OK-Tubrod 15.14 0,05C–0,5Si–1,3Mn	170	21	0,25	205	24,5	0,20	205	24,5	0,32	–	–	–
2	JS-10 0,09C–0,5Si–1,5Mn	160	21	0,30	220	25	0,25	220	25	0,25	255	31	0,42

Примечание. Коэффициент наплавки $\alpha_n = 16 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{ч})$.



Таблица 2. Результаты расчета параметров формирования ЗП для вариантов № 1 и 2 из табл. 1

№ варианта	№ прохода	$q_{п}$, Дж/см	F , мм	Химический состав, %
1	1	9996	60	0,08C-1,3Mn-0,477Si-0,068Ni-0,003Al; $P_{см} = 0,162$
	2	17787	80	0,059C-1,3Mn-0,493Si-0,021Ni-0,002Al; $P_{см} = 0,140$
	3	10865	64	0,05C-1,3Mn-0,50Si-0,0Ni-0,001Al; $P_{см} = 0,132$
	4	—	—	—
2	1	7910	47	0,013C-1,448Mn-0,77Si-0,077Ni-0,003Al; $P_{см} = 0,22$
	2	15400	75	0,111C-1,453Mn-0,784Si-0,07Ni-0,002Al; $P_{см} = 0,200$
	3	15400	79	0,113C-1,45Mn-0,77Si-0,076Ni-0,003Al; $P_{см} = 0,212$
	4	13247	59	0,102C-1,52Mn-0,87Si-0,03Ni-0,001Al; $P_{см} = 0,207$

Таблица 3. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных

Величина, участок соединения	Вариант № 1	Вариант № 2
HV, ЗП	200...220	195...208
	170...200	180...220
HV, ЗТВ	198...230	196...220
	200...240	220...240
KCV ₋₂₀ МДж/м ² , ЗП	1,2...2,3	1,4...2,9
	1,5...2,6	1,2...2,0
KCV ₋₂₀ МДж/м ² , ЗТВ	—	—
	1,2...1,5	1,0...1,4

Примечание. В числителе приведены экспериментальные данные, в знаменателе — расчетные.

Первый вариант — дуговая механизированная сварка в CO₂ проволокой диаметром 1,2 мм ОК-Tubrod 15.14 фирмы ESAB. Второй вариант — сварка проволокой диаметром 1,2 мм JS-10 (Италия) в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂.

Паспортные данные относительно рекомендуемых режимов сварки и химического состава наплавляемого металла (без участия основного) приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены результаты расчета параметров формирования ЗП (погонная энергия $q_{п}$, площадь сечения F , химический состав), а на рис. 7–9 (см. вклейку между с. 18–19) — расчетные значения микроструктур и механические свойства в ЗП и ЗТВ. Сравнение расчета и эксперимента дано в табл. 3.

Авторы располагали экспериментальными данными относительно твердости HV и вязкости разрушения KCV₋₂₀ металла ЗП и ЗТВ, полученными при стандартной процедуре сварки образцов данной стали, на режимах из табл. 1.

Из табл. 3 видно хорошее согласование расчета и экспериментов по твердости и ударной вязкости

Structure of a computer system developed by the authors for a rational selection of welding consumables for electric arc welding of structural steel is presented. The system was based on mathematical modeling of physical-metallurgical phenomena in arc welding using data of companies-manufacturers of welding consumables, including chemical composition of the metal deposited, welding conditions, and also coefficients of deposition.

для металла шва, т. е. ЗП. Для металла ЗТВ, имеющего ширину порядка 1 мм, экспериментальные данные по KCV достаточно чувствительны к позиционированию надреза. При аккуратно выполненном эксперименте они обычно ниже, чем для ЗП. Расчетные данные в табл. 3 не противоречат этому положению.

Сопоставив расчетные результаты для рассматриваемых двух вариантов, можно сделать следующие выводы. Вариант № 1 позволяет получить металл в ЗП с меньшим содержанием углерода и соответственно с более низким $P_{см} = 0,132...0,162$ (для варианта № 2 в ЗП $P_{см} = 0,201...0,212$, что однако ниже, чем в основном металле), что приводит к более низкому содержанию закалочных микроструктур в ЗП (для варианта № 1

на рис. 7, а-с микроструктура в ЗП следующая: $V_b = 0,40...0,65$, $V_m < 0,12$, остальное — ферритно-перлитная смесь; для варианта № 2 (рис. 7, d-f) $V_b = 0,4...0,45$, $V_m < 0,25$). Более высокое содержание бейнита приводит к более высоким прочностным характеристикам. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление σ_B для варианта № 1 (рис. 8, c, b) равны в ЗП: $\sigma_{0,2} = 380...440$ МПа, $\sigma_B = 540...720$ МПа, а для варианта № 2 (рис. 8, g, f): $\sigma_{0,2} = 420...500$ МПа, $\sigma_B = 620...720$ МПа.

Соответственно вариант № 1 имеет более высокие пластические свойства в ЗП: относительное удлинение $\delta = 18...26$ % и относительное сужение $\psi = 44...52$ % (рис. 8, a, d). Для варианта № 2 эти характеристики в ЗП следующие: $\delta = 16...22$ %, $\psi = 40...46$ % (рис. 8, e, h). Ударная вязкость KCV₋₂₀ в рассматриваемых вариантах в ЗП (рис. 9, b, e) выше в варианте № 1 (см. табл. 3).

Таким образом, с помощью расчетной системы получен достаточно представительный материал, на основе которого можно сделать обоснованное предпочтение варианту № 1 по требованиям пластичности и ударной вязкости, а варианту № 2 — по величинам $\sigma_{0,2}$ и σ_B .

Из изложенного и приведенных расчетных данных следует, что обоснованный выбор сварочных материалов для дуговой сварки конкретных конструкционных сталей можно проводить с помощью предлагаемой компьютерной системы, оставляя эксперименту получение данных для окончательного решения.

1. *Welding handbook*. English edition. Vol. 4: Materials and applications. Pt. 2. 8-th ed. — AWS, 1998. — 620 p.
2. *Касаткин О. Г.* Математическое моделирование зависимостей «состав — свойства» сварных соединений и создание расчетно-экспериментальной системы для оптимизации основных технологических факторов сварки низколегированных конструкционных сталей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1990. — 32 с.

Поступила в редакцию 26.11.2002