



УДК 621.791.75

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

О. В. МАХНЕНКО, И. И. ПРУДКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены существующие компьютерные программные обеспечения (ПО), позволяющие проводить выбор оптимальных технологических параметров дуговой сварки конструкционных сталей. Проведен анализ преимуществ и недостатков рассмотренных ПО с точки зрения их применения сварщиком-технологом при разработке на производстве технологического процесса сварки. По функциональным возможностям рассмотренные ПО принадлежат к различным группам программных продуктов. ПО «Вертикаль» с модулем «Система расчета режимов сварки» относится к группе САПР. ПО Magsim, «Система компьютерного анализа свариваемости сталей», VirtualARC, Welding Simulation Suite, Simufact Welding можно отнести к специализированным системам инженерного анализа для моделирования технологических процессов. К этой группе программных продуктов можно отнести коммерческие ПО конечно-элементного анализа общего назначения, такие как Abagus, Ansys, LS-Dyna, Catia и др., которые являются близкими к специализированным системам по функциональным возможностям моделирования технологических процессов сварки и термической обработки. На основе анализа преимуществ и недостатков наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки сформулированы цели дальнейшего совершенствования разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины компьютерной системы по выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей. Библиогр. 17, рис. 10.

Ключевые слова: программное обеспечение, математическое моделирование, технологический процесс, сварка, сварочные материалы, термическая обработка

В настоящее время развитие научно-технического прогресса привело к широкому использованию компьютерных технологий на стадии подготовки производства. Во всем мире создается большое количество специального программного обеспечения (ПО), позволяющего виртуально воспроизводить различные технологические процессы.

Сокращение сроков разработки и повышение требований по качеству производства сварных конструкций вызвало создание целого ряда компьютерных программ, которые облегчают и ускоряют работу инженера-сварщика или инженера-технолога по разработке новых сварных конструкций и технологий сварки. Эти программные продукты можно условно разделить на две основные группы: системы автоматического проектирования технологических процессов (САПР ТП), которые, как правило, интегрированы с системами 3D-моделирования для решения конструкторских задач, и системы инженерного анализа для моделирования технологических процессов сварки.

В ИЭС им. Е. О. Патона было создано сварочное ПО Arcweldsys (системы выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей), которое предназначено для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств

математического моделирования [1]. В данной статье проанализированы преимущества и недостатки наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки и сформулированы цели дальнейшего совершенствования разработанной в ИЭС компьютерной системы по выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей.

К группе САПР ТП относится ПО «Вертикаль», модуль «Система расчета режимов сварки» (рис. 1, 2), разработанное фирмой «Ascon» (Рос-

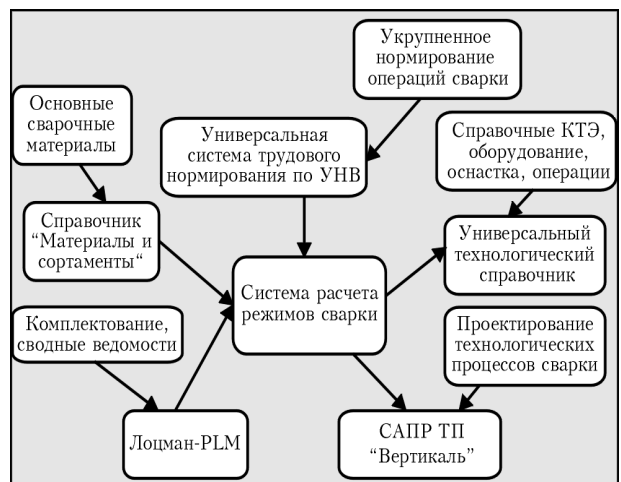


Рис. 1. Принципиальная схема модуля «Система расчета режимов сварки»

© О. В. Махненко, И. И. Прудкий, 2013

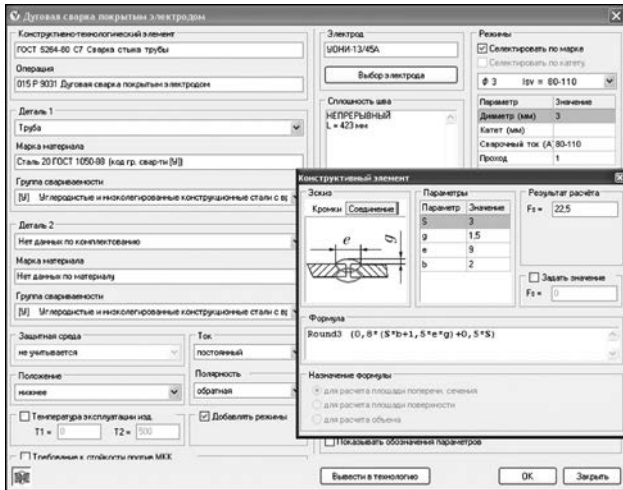


Рис. 2. Окно программы «Вертикаль»

сия) для комплексной автоматизации работ технолога-сварщика при проектировании техпроцессов сварки [2–4]. Для работы САПР ТП «Вертикаль» необходима установленная ранее система 3D-моделирования «Компас» или другая аналогичная система. Модуль работает в структуре САПР и решает следующие задачи: автоматизированный подбор режимов для основных процессов сварки, автоматизированный подбор и расчет норм расхода сварочных материалов, расчет расхода электроэнергии и основного времени на технологический переход.

При проектировании техпроцессов сварки и подборе режимов в модуле учитываются конструктивные элементы сварных швов, положение шва в пространстве, применяемые материалы, характеристики оборудования и другие необходимые параметры. Способ сварки деталей может быть указан для всего шва или отдельно для каждого сварочного прохода, возможен автоматизированный подбор сварочных материалов с учетом требований к межкристаллитной коррозии и условиям эксплуатации сварной конструкции.

Подбор сварочных материалов и технологических параметров сварки осуществляется на ос-

нове информационного банка знаний, включающего соответствующие справочники «Материалы и сортамент», «Универсальный технологический справочник» (рис. 1). Фактически модуль является расчетно-информационной системой, в основе которой не используется моделирование процесса сварки. Большое количество сервисных функций, облегчающих составление документации по техпроцессу сварки, делает это ПО достаточно удобным для технолога-сварщика на производстве. К недостаткам ПО «Вертикаль» с модулем «Система расчета режимов сварки» можно отнести возможное возникновение проблем при подборе технологических параметров сварки в случае новых материалов или способов сварки, для которых нет данных в имеющихся базе данных и базе знаний, а также достаточно высокую трудоемкость и стоимость внедрения этой системы в производство, связанную с необходимостью установки системы 3D-моделирования и САПР ТП «Вертикаль», что также обуславливает высокую стоимость.

На базе совместных исследований Тульского государственного университета (Россия) с техническим университетом г. Ахена (Германия) создано ПО Magsim (рис. 3) для численного анализа, диагностики и параметрической оптимизации процесса дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах [5–7]. ПО Magsim можно отнести к системам инженерного анализа для моделирования технологических процессов. С его помощью у инженера-сварщика появляется возможность моделировать влияние параметров режима сварки на качество формирования сварного соединения с целью снижения количества экспериментальных образцов. ПО позволяет проводить статистическую оценку влияния отклонений технологических параметров при сварке на качество шва, а также автоматически определять оптимальные параметры.

К недостаткам Magsim в первую очередь относится то, что результаты моделирования сварки ограничены только проблемой формирования сварного соединения, хотя кроме этой информации для инженера-сварщика на производстве при разработке технологии сварки необходимо получение и других технологических данных, например, механических свойств сварного соединения, риска образования горячих и холодных трещин и т. п.

Наиболее мощной специализированной системой моделирования технологических процессов сварки и термической обработки является набор программных продуктов, объединенных в линейку Welding Simulation Suite [8, 9]. Разработчиком такой системы является французская фирма «ESI Group», которая является одним из лидеров по созданию САПР и моделированию технологических процессов. В указанный набор ПО входят:

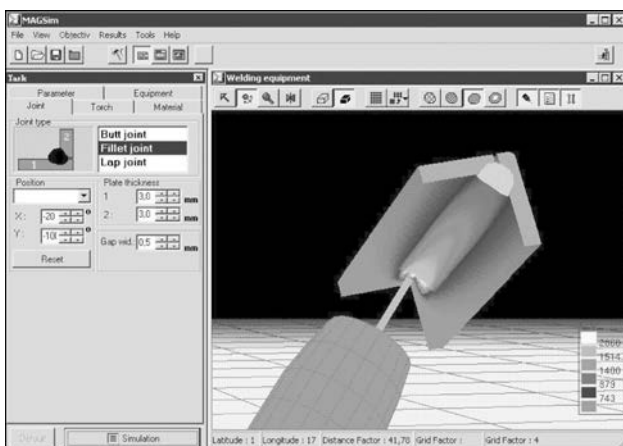


Рис. 3. Окно программы Magsim

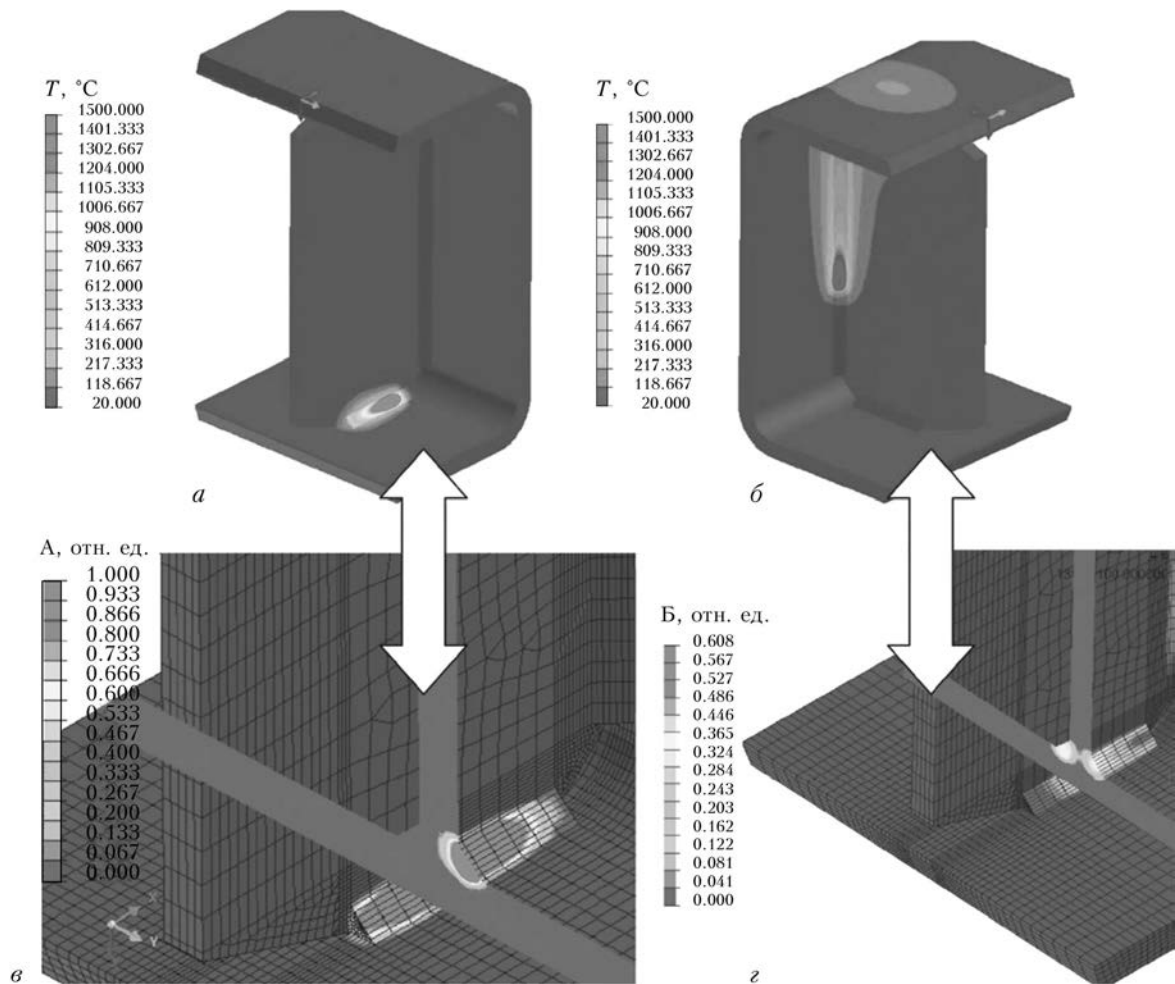


Рис. 4. Результаты, полученные в ПО Sysweld/Visual-Weld: а, б — распределение тепловых полей; в, з — относительное содержание соответственно аустенита (А) и бейнита (Б) в шве

— ПО Sysweld/Visual-Weld — для моделирования локальных участков сварных конструкций;

— ПО Weld Planner — для моделирования процесса сварки тонколистовых конструкций;

— ПО Pam-Assembly — для моделирования процессов сборки-сварки геометрически сложных крупногабаритных конструкций.

Программа Sysweld/Visual-Weld позволяет моделировать процессы сварки и термической обработки, временные и остаточные напряжения и деформации сварного узла или конструкции, механические характеристики и прочность материалов, подвергнутых указанным технологическим обработкам (рис. 4). Моделирование сварочных процессов включает все типы технологий сварки с учетом механических, тепловых и металлургических свойств материала. Модели и базы данных, которые включены в ПО Sysweld/Visual-Weld, позволяют проводить анализ теплометаллургических процессов для сталей и алюминиевых сплавов. Программа работает с термокинетическими диаграммами, которые описывают процесс фазовых переходов (рис. 5).

ПО имеет возможность получения геометрической модели сварного узла или конструкции, созданной в среде какой-либо САПР. Результаты расчетов, в том числе напряжения и деформации, могут быть экспортированы для дальнейших расчетов в другие дополнительные расчетные модули, разработанные фирмой «ESI Group», такие как:

— Systus — изучение зарождения и распространения усталостных трещин;

— Pam-Stamp — анализ процессов штамповки сварных листовых деталей;

— Pamcrash — анализ разрушений сварных конструкций.

Программный набор Welding Simulation Suite характеризуется во многих случаях избыточными возможностями и сложностью для инженера-сварщика на производстве, требует специальных знаний по применению расчетных методов и длительного периода обучения пользователя, имеет высокую стоимость.

Также специализированной системой моделирования технологических процессов сварки является модуль Simufact Welding [10], входящий в систему общего инженерного анализа различных

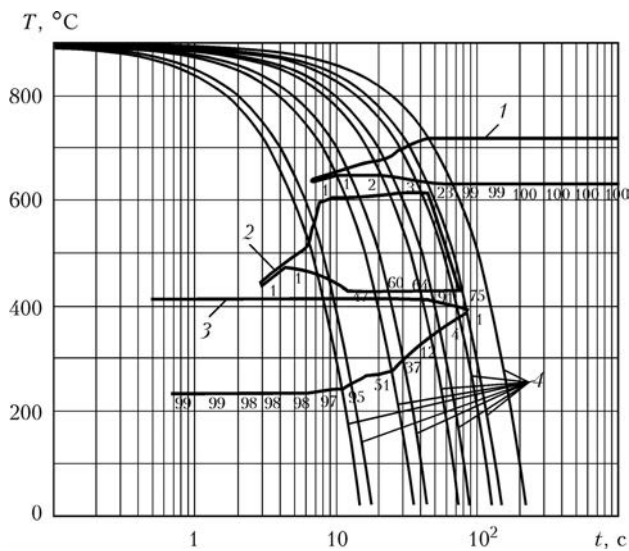


Рис. 5. Программное представление термокинетической диаграммы в ПО Sysweld/Visual-Weld: 1–4 — соответственно фазы № 1–4

технологических процессов Simufact (Simufact Engineering GmbH, Germany) [11]. Указанный модуль в первую очередь предназначен для прогнозирования сварочных деформаций, но также позволяет оценивать свойства зоны проплавления (ЗП) и ЗТВ. Проблемно-ориентированный пользовательский интерфейс помогает инженеру-сварщику проводить достаточно сложное моделирование физико-металлургических процессов при сварке. ПО основано на сочетании аналитических подходов и нелинейного численного моделирования. По описанию разработчика ПО характеризуется следующей функциональностью:

- синхронизированный по времени контроль работы нескольких сварочных роботов;
- быстрый расчет различных вариантов, отличающихся параметрами сварки;
- быстрое изменение параметров процесса сварки (последовательности и скорости сварки, параметров сварочного нагрева и условий закреплений);

оптимизация размеров и свойств ЗП, ЗТВ, а также уровня сварочных напряжений и деформаций.

К преимуществам ПО Simufact Welding можно отнести достаточно широкие возможности моделирования процесса сварки с целью прогнозирования качества формирования сварного соединения, в том числе многопроходного, определения свойств ЗП и ЗТВ с учетом структурных превращений, временных и остаточных сварочных напряжений и деформаций. Несмотря на использование достаточно сложных математических моделей, ПО ориентировано на инженерное применение на производстве. Отличительной способностью ПО является возможность проведения оптимизации роботизированной сварки и осуществления контроля синхронизированной работы сварочных роботов на производстве.

Близкими к специализированным системам по функциональным возможностям моделирования технологических процессов сварки и термической обработки являются коммерческие пакеты конечно-элементного анализа общего назначения, такие как Abaqus, Ansys, LS-Dyna, Catia и др. В последних версиях некоторых из этих пакетов появились специализированные расчетные модули для моделирования процессов сварки [12].

Например, Abaqus не является специализированным сварочным ПО, но может применяться для моделирования движущихся источников тепла и проведения анализа тепловых и механических процессов при сварке (рис. 6). Анализ тепловых процессов проводится с помощью пользовательских подпрограмм [13]:

Dflux — используется для определения теплотеноса при сварке в случае концентрированного теплового потока, который движется вдоль линии сварки, имитируя движение сварочного источника нагрева;

Garson — используется для активации теплопроводности между основным и присадочным материалом, когда сварочный источник проходит определенный элемент;

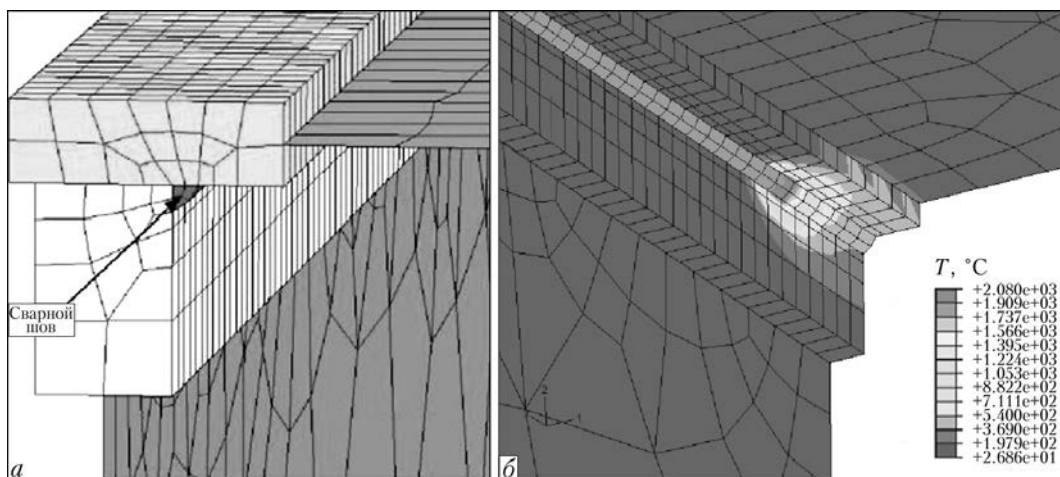


Рис. 6. ПО Abaqus: а — конечно-элементная модель сварного узла; б — распределение тепловых полей



Film — используется для активации теплопроводности для имитации процесса охлаждения, когда сварочный источник проходит определенный элемент.

Результаты теплового анализа используются как входные данные для решения механической задачи, в результате которой определяются сварочные напряжения и деформации. Для проведения моделирования теплометаллургических процессов при сварке необходима разработка своими силами или покупка у стороннего разработчика дополнительных программных модулей, учитывающих микроструктурные превращения в сталях при сварочных температурных циклах. К недостаткам также можно отнести высокую сложность программы, необходимость длительного обучения работе с ней, высокую стоимость. Все эти факторы делают ПО Abaqus, как и другие коммерческие ПО конечно-элементного анализа общего назначения, малоприемлемыми для разработки технологии сварки инженером-сварщиком на производстве.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана «Система компьютерного анализа свариваемости сталей» (рис. 7) [14, 15], которая включает инже-

нерную часть для оперативного анализа технологических вариантов сварки типовых соединений, реализованную на основе программного комплекса «Свариваемость легированных сталей» [16] и базе данных свойств материалов.

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 ЗП, микроструктуре металла ЗП и ЗТВ, склонности к образованию горячих трещин, стандартным механическим характеристикам (твердости, пределу текучести, временному сопротивлению, относительному удлинению и сужению, ударной вязкости) в различных участках сварного соединения, а также специальным 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

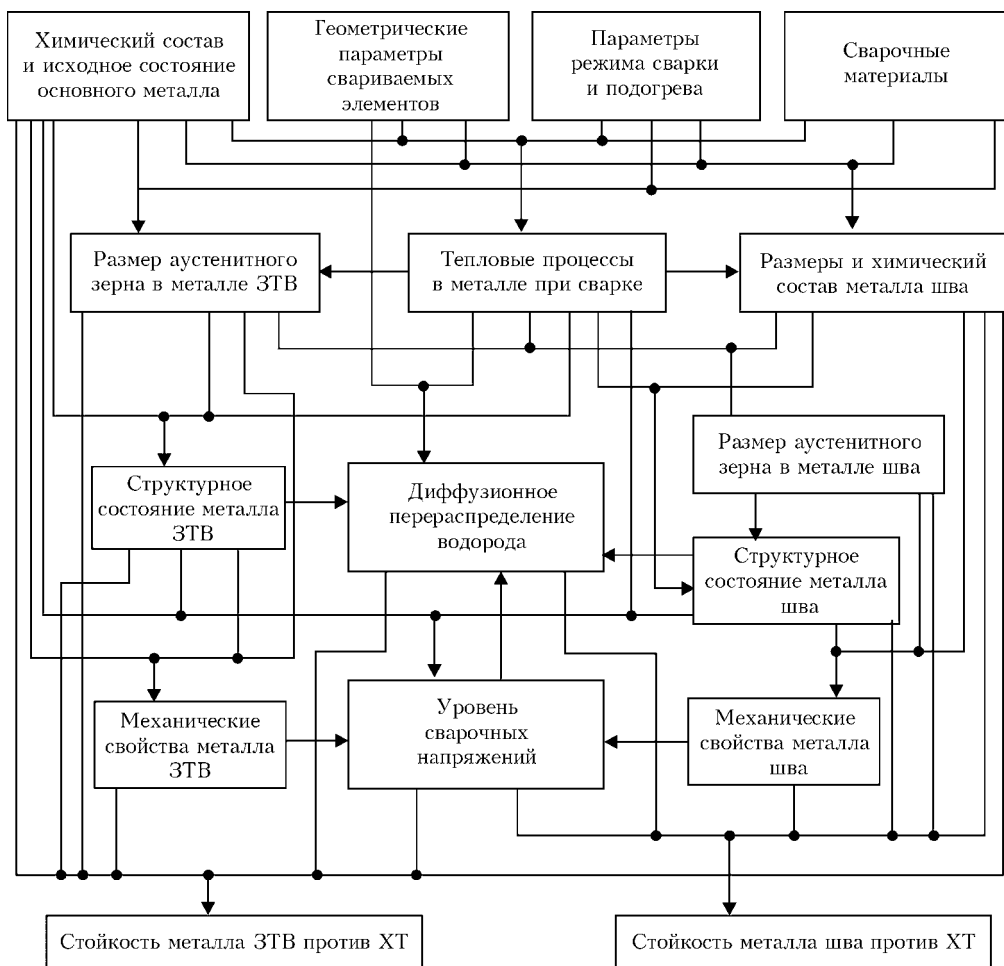


Рис. 7. Схема взаимосвязей показателей свариваемости низколегированных сталей с процессами, протекающими в металле при сварке, в ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей»

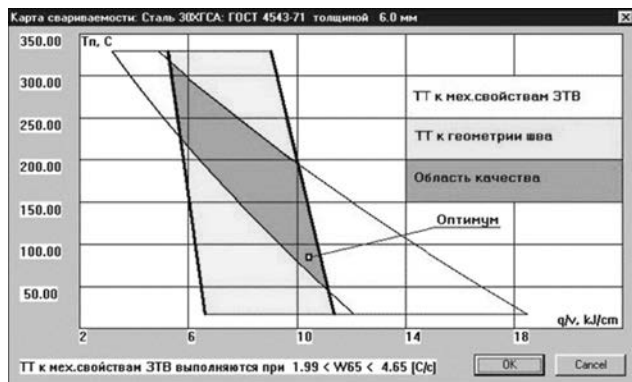


Рис. 8. Построение области качества при оптимизации теплового режима сварки в ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей»

большой ассортимент сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей, обоснованный выбор рационального варианта экспериментальным путем требует либо большого опыта, либо многочисленных экспериментов.

ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей» позволяет значительно сократить трудоемкость проектирования технологии сварки и решать задачи оптимизации технологических параметров процесса многослойной сварки низколегированных сталей. Комплексный анализ технологических вариантов сварки выполняется путем моделирования совокупности протекающих в металле физико-металлургических процессов, формирующих показатели свариваемости. Оптимизация теплового режима сварки проводится для обеспечения требуемого комплекса свойств металла ЗТВ. На этом этапе расчета определяются параметры режима сварки и подготовки кромок соединения, обеспечивающие получение сварного шва заданных размеров, а также температура подогрева для достижения требуемого структурного состояния металла ЗТВ и стойкости к образованию холодных трещин (рис. 8).

ПО «Система компьютерного анализа свариваемости сталей» создано с целью более доступного моделирования процесса многослойной сварки для инженера-сварщика на производстве.

Для облегчения настройки роботизированного сварочного оборудования в условиях современного высокотехнологичного производства разработано ПО VirtualARC (разработчик компания «АВВ», Швейцария), которое является эффективным инструментом выбора оборудования и параметров процесса МИГ/МАГ сварки. ПО имеет удобный графический интерфейс, сочетает 2D-моделирование, данные экспериментальных измерений и нейронные сети для прогнозирования формирования сварного шва при дуговой сварке низкоуглеродистых сталей.

Результаты моделирования физики дуги, тепло- и массопереноса используются в качестве входных данных нейронной сети для прогнози-

рования качества и размеров сварного шва, а также возможных дефектов сварки. Основные функции ПО VirtualARC по данным разработчика [17]:

- планирование технологического процесса МИГ/МАГ сварки;
- настройка МИГ/МАГ параметров сварки;
- прогнозирование формы и проплавления сварного шва;
- прогнозирование геометрических параметров сварного шва;
- прогнозирование геометрических дефектов сварки;
- оценка стоимости сварки;
- формирование технологической документации;
- оптимизация производительности и качества сварочного процесса.

Таким образом, основной специализацией ПО VirtualARC является выбор оптимального оборудования и режимов сварки с позиции качественного формирования сварного соединения при МИГ/МАГ сварке низкоуглеродистых сталей. К недостаткам можно отнести то, что программа не учитывает структуру и механические свойства получаемого сварного соединения. Класс низкоуглеродистых сталей также ограничивает практическое применение ПО.

В начале 2000-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона была разработана компьютерная система Arcweldsys [1], предназначенная для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе альтернативных сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств математического моделирования и соответствующего информационного обеспечения. 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 наплавленного металла. Эти данные вводятся в систему пользователем одновременно с указанием типа свариваемой конструкционной стали (основного материала) и ее химического состава.

В результате 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 $-20...-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗП и ЗТВ;

риск образования горячих и холодных трещин.

В процессе практического применения системы были выявлены следующие основные недостатки: неудовлетворительная точность расчета температурных полей в случае сварки с большой скоростью движения источника нагрева вследствие применения расчетных алгоритмов в рамках двухмерных задач; невозможность моделирования сварки для таких материалов, как нержавеющая сталь, алюминиевые и титановые сплавы; неудобный интерфейс программы. Но в основном система оказалась достаточно эффективной, нашла целый ряд заказчиков в Украине,

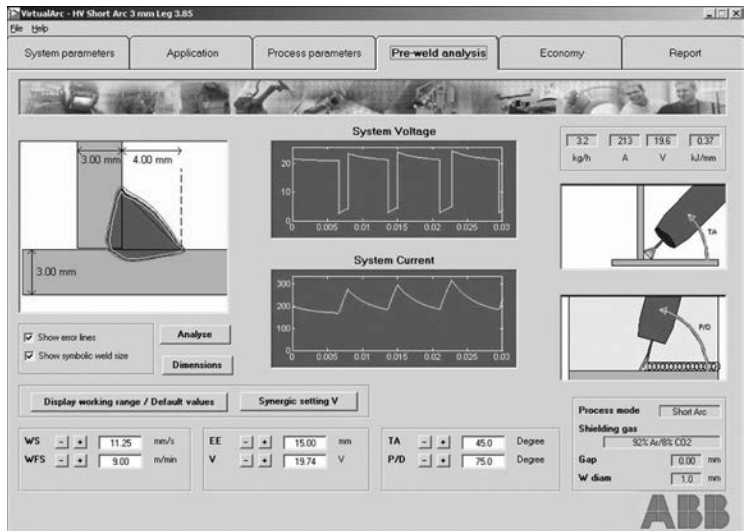


Рис. 9. Окно программы VirtualARC

также с ее помощью были выполнены многочисленные исследования специалистами ИЭС им. Е. О. Патона.

На основе рассмотрения преимуществ и недостатков наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки и в результате проведенного анализа эффективности применения разработанной компьютерной системы, а также с учетом развития современной компьютерной техники и расчетных методов математического моделирования, физико-химических и металлургических процессов при сварке целесообразным является дальнейшее совершенствование существующей версии компьютерной системы. Такое усовершенствование происходит на основе доработки математических моделей и расчетных алгоритмов по определению температурных полей (циклов) для различных типов сварных соединений, в том числе за счет применения трехмерных моделей, расширения области применения системы на класс нержавеющих сталей за счет добавления новых математических моделей и соответствующих расчетных алгоритмов по определению дополнительной важной для инженера-сварщика информации. Например, степени сенсibilизации металла вследствие сварочного цикла при многопроходной сварке нержавеющих сталей, усовершенствование и дополнение баз данных по свойствам основного и сварочных материалов, в том числе введение в банк данных свойств материалов термокинетических диаграмм в цифровом виде для более точного описания фазовых превращений при сварочном температурном цикле, создание более удобного и интуитивно понятного пользовательского интерфейса системы с дополнительными служебными функциями по автоматизированному оформлению технологической документации.

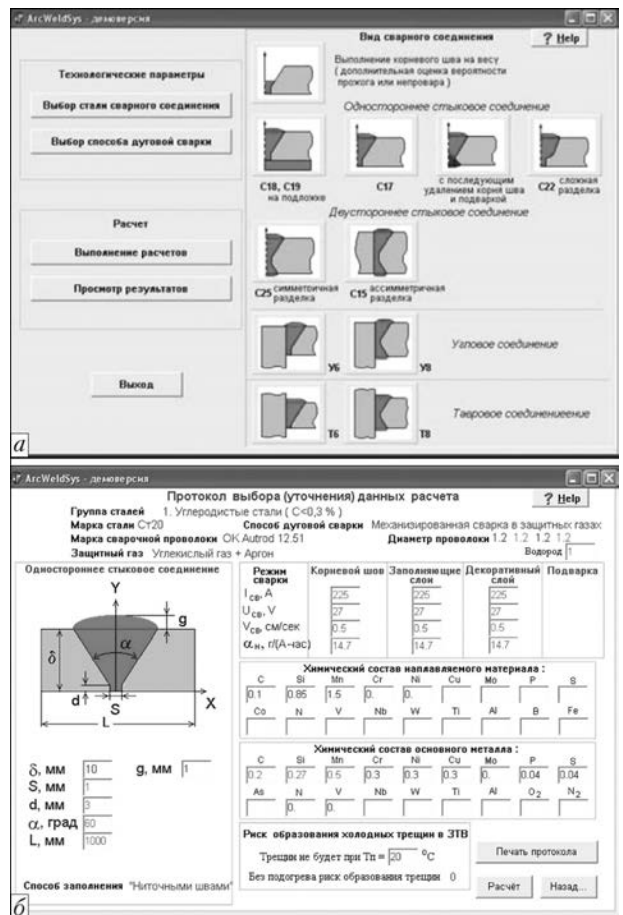


Рис. 10. Интерфейс программы Arcweldsys: а — основное окно; б — протокол выбора данных расчета

Выводы

1. Анализ существующих в Украине и за рубежом программных продуктов в области моделирования технологии сварки показал, что современный инженер-сварщик имеет достаточно мощные ин-



струменты по разработке новых сварных конструкций и технологий сварки.

2. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создано специализированное сварочное ПО Agsweldsys (системы выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей), которое предназначено для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств математического моделирования.

3. В результате сравнения преимуществ и недостатков наиболее известных программных продуктов в области моделирования технологии сварки сформулированы цели дальнейшего совершенствования разработанной в ИЭС компьютерной системы по выбору сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей, направленные на повышение точности получаемых прогнозных результатов и удобства в работе с ней инженера-сварщика.

1. *Махненко В. И., Королева Т. В., Лавриненко И. Г.* Компьютерная система выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 14–18.
2. САПР ТП «Вертикаль», модуль «Система расчета режимов сварки». — <http://www.ascon.kiev.ua>
3. *Гуляев В.* Конфигуратор конструктивно-технологических элементов и режимов сварки для САПР ТП «Вертикаль» // Оборудование и Инструмент для профессионала. Сер. Металлообработка. — 2012. — № 5 (электрон. изд.).

4. *Гуляев В., Хармац И.* Автоматизация проектирования технологических процессов сварки // САПР и графика. — 2008. — № 4. — С. 90–92.
5. *Magsim.* — <http://comhightech.tsu.tula.ru/software/magsim-r.htm>
6. *Судник В. А., Иванов А. В., Дилтай У.* Анализ эффективной мощности импульсной дуги при МАG-сварке сталей методом математического моделирования с экспериментальной проверкой: Сб. избр. тр. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. — Тула: ТулГУ, 1999. — С. 64–80.
7. *Die Simulationswerkzeuge des ISF: MAGSim, BeamSim, SimWeld / I. Dikshev, U. Diltthey, J. Gollnick et al.* // Sitzung der DVS-Arbeitsgruppen I 1 und I 2. — Rostock, Deutschland, 24.06.2004.
8. *ESI Welding Simulation Suite.* — <http://esi-russia.ru/taxonomy/term/5>.
9. *Биленко Г.* Моделирование процессов сварки в программных продуктах ESI на примере детали локомотива // Металлург. — 2012. — № 3. — С. 18–21.
10. *Wohlmuth M.* Practical design of industrial welding processes // Welding and Cutting. — 2011. — № 6. — P. 346–347.
11. *SIMUFACT. WELDING.* — <http://www.simufact.com>
12. *Pakos R., Szymczak M.* Przegląd programów komputerowych do przewidywania odkształcen i symulacji procesów spawalniczych na wczesnych etapach produkcji // Przegląd Spawalnictwa. — 2010. — № 3. — S. 32–39.
13. *Abaqus.* — <http://abaqus.com>
14. *Макаров Э. Л., Коновалов А. В.* Система компьютерного анализа свариваемости и технологии сварки конструкционных легированных сталей // Свароч. пр-во. — 1995. — № 3. — С. 6–9.
15. *Коновалов А. В.* Программное обеспечение для численного анализа показателей свариваемости низколегированных сталей при многослойной сварке // «Наука и Образование». — 2004. — № 10 (электрон. изд.).
16. *Куркин А. С., Макаров Э. Л.* Программный комплекс «Сварка» — инструмент для решения практических задач сварочного производства // Сварка и Диагностика. — 2010. — № 1. — С. 16–23.
17. *Virtualarc.* — <http://www.abb.ua>

Поступила в редакцию 10.01.2013

«МОТОР СИЧ» БУДЕТ ОСНАЩАТЬ СВОИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ЧЕШСКИЕ САМОЛЕТЫ L-159

Крупнейший в СНГ производитель авиадвигателей и газотурбинных установок компания «Мотор Сич» (Запорожье) будет поставлять двигатели Au-222-28 для самолетов L-159 производства «Аеро Vodochody» (Чехия). Об этом заявил председатель совета директоров «Мотор Сичи» В. Богуслаев. По его словам, компания уже подписала соответствующий протокол с чешской стороной.

В данный момент на самолеты L-159 устанавливаются американские двигатели. «Из-за того, что там стоят дорогие американские двигатели, эти самолеты мало кто покупает. Наши двигатели не хуже, но стоят значительно дешевле, что поможет продавать эти самолеты лучше», — отметил В. Богуслаев.

Кроме того, он сообщил, что учебно-боевые самолеты L-39, которые являются основными при подготовке военных летчиков в России, получают новые модернизированные двигатели производства «Мотор Сич» большей мощности. Опытный экземпляр самолета с таким двигателем уже прошел летные испытания в Одессе.

«Учебно-боевые самолеты чешского производства L-39, остающиеся на данный момент основной машиной для подготовки российских летчиков, будут модернизировать и ремонтировать в Ейске», — сообщил В. Богуслаев журналистам. По его оценке, до 2020 г. L-39 останется основным самолетом первоначального обучения для базовой подготовки российских летчиков.

«Мотор Сич» планирует также разработать новый более экономичный двигатель для ближнемагистральных украинских самолетов Ан-148 и Ан-158. Кроме того, запорожское предприятие намеревается начать поставки в США двигателей для американских вертолетов «Sikorsky S-61».