



УДК 621.791.75.01

**Е. В. Шаповалов, В. В. Долиненко,
В. А. Коляда**, кандидаты техн. наук, **Т. Г. Скуба**
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
(Украина, 03680, ГСП, Киев-150, ул. Боженко, 11,
тел.(044) 2052195, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua)

Комплекс математического и имитационного моделирования роботизированной многопроходной многослойной сварки

Разработан комплекс математического и имитационного моделирования автоматизированной системы управления роботизированной многопроходной сваркой, в котором базы данных использованы для решения обратной задачи управления. Их состав сформирован на основе результатов численного моделирования в среде универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS. В алгоритме управления многопроходной сваркой применён оптимальный стохастический регулятор с обратной связью, сигнал которой формируется лазерно-телевизионным сенсором.

Запропоновано комплекс математичного та імітаційного моделювання автоматизованої системи управління роботизованим багатопохідним зварюванням, в якому бази даних використовуються для вирішення зворотної задачі управління. Їхній склад сформовано на основі результатів чисельного моделювання в середовищі універсальної програмної системи кінцево-елементного аналізу ANSYS. У алгоритмі управління багатопохідним зварюванням застосовано оптимальний стохастичний регулятор із зворотним зв'язком, сигнал якого формується лазерно-телевізійним сенсором.

К л ю ч е в ы е с л о в а : роботизированная многопроходная многослойная сварка, манипулятор сварочной горелки, кинематическая модель манипулятора, термомеханическая модель, гидромеханическая модель.

Роботизированная многопроходная многослойная сварка с использованием электрической дуги в среде защитного газа (МАГ) ориентирована в основном на сварку крупногабаритных конструкций в судостроении, общем машиностроении и строительстве. Номенклатура изделий и стыков, свариваемых этим методом, достаточно широка: корпусные изделия (судостроение); прямошовные, спиральношовные трубы; кольцевые стыки, вертикальные и горизонтальные стыки на вертикальной поверхности (резервуары); стыки криволинейной формы (приварка лопастей турбин) и др. [1]. Наиболее эффективно использование роботизированной многопро-

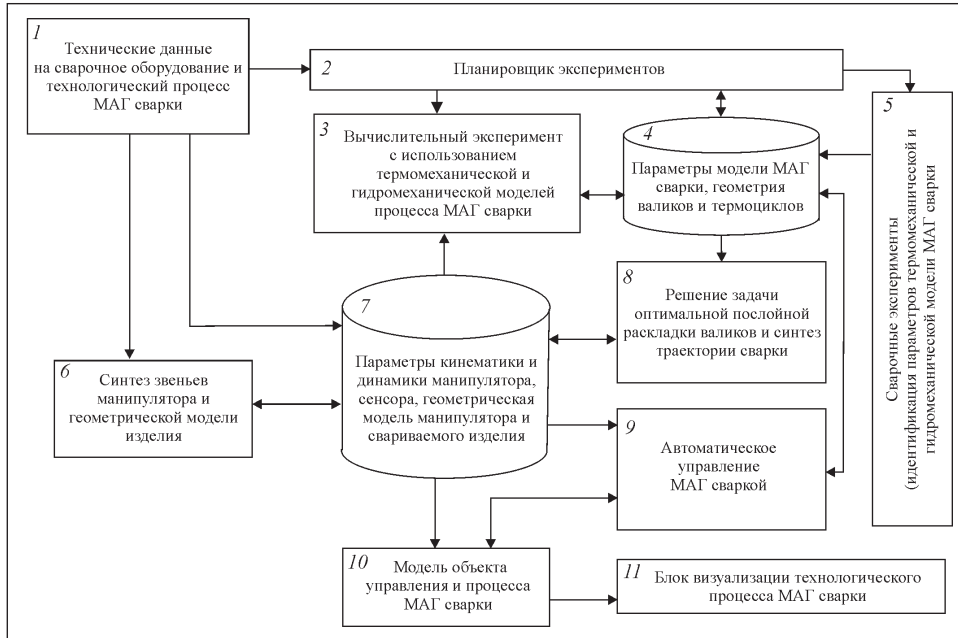


Рис. 1. Структурная схема системы моделирования АСУ многопроходной сваркой

ходной сварки в случаях, когда отсутствует возможность кантовки крупногабаритных изделий в процессе сварки. В этих случаях применяются многозвенные манипуляторы (сварочные роботы), которые обеспечивают заполнение разделки при различных пространственных положениях свариваемого изделия.

Для обеспечения гарантированной производительности сварки и качества сварных соединений, формируемых с помощью многопроходной МАГ сварки, принципиально необходима автоматизированная система управления (АСУ) [2, 3], функциями которой являются: геометрическая адаптация — управление траекторией перемещения сварочной горелки при наплавке слоев в соответствии с реальной геометрией разделки; технологическая адаптация — управление текущими значениями параметров технологического режима сварки для обеспечения постоянной толщины и заданных механических свойств наплавляемых слоев металла.

В то же время, разработка АСУ многопроходной сваркой представляет собой дорогостоящий и наукоемкий процесс. Сокращение стоимости и времени введения разрабатываемой системы автоматического управления в эксплуатацию возможно при использовании специализированной САПР — комплекса инструментов моделирования кинематики и динамики роботов и технологического процесса многопроходной сварки, которые в

настоящее время недоступны. Эти инструменты позволяют создать и протестировать математическое и алгоритмическое обеспечение для управления манипулятором и технологическим процессом с помощью трехмерных графических моделей. Такой подход позволяет создавать АСУ в режиме «off line» и значительно сократить число натуральных сварочных экспериментов [4, 5].

Разработке математического и программного обеспечения для управления процессами многопроходной МАГ сварки посвящены работы [4—7] и др.

Рассмотрим способ создания комплекса математического и имитационного моделирования автоматического управления роботизированной многопроходной многослойной МАГ сваркой на основе решений обратной задачи, рассчитанных в режиме «off line» (рис. 1). Обратная связь по положению сварочной горелки замкнута с помощью лазерно-телевизионного сенсора (ЛТС) [4]. Комплекс состоит из кинематической и динамической моделей манипулятора сварочной горелки, модели формирования сварного шва, автоматического регулятора режима многопроходной роботизированной МАГ сварки, баз данных форм валиков, термоциклов и параметров технологического процесса, а также модуля визуализации.

Исходными данными для создания математической и алгоритмической моделей технологического процесса многослойной многопроходной роботизированной МАГ сварки являются технические данные (блок 1): тип и характеристики источника питания дуги; кинематическая схема манипулятора сварочной горелки и его динамические характеристики; геометрические и физические параметры свариваемого изделия; параметры технологического процесса сварки (диапазон изменения сварочного тока, напряжение сварки, скорость сварки, диаметр электродной проволоки, химический состав основного и присадочного металла и др.)

Параметры технологического процесса сварки передаются модулю 2, который предварительно формирует запросы к базе данных (блок 4) и проверяет наличие информации о геометрических размерах валика усиления сварного шва, соответствующих значениям заданного диапазона режимов сварки. В случае отсутствия необходимой информации модуль 2 формирует задание для проведения натуральных сварочных (блок 5) или(и) вычислительных (блок 3) экспериментов. Сварочные эксперименты используются для идентификации таких параметров процесса сварки как к.п.д. сварки, радиус теплового и силового воздействий электрической дуги, а также значения скрытой теплоты плавления конкретной марки стали.

Вычислительные эксперименты проведены на имитационной модели многопроходной МАГ сварки в среде универсальной программной системы конечно-элементного (КЭ) анализа ANSYS (Multiphysics и FLUENT).

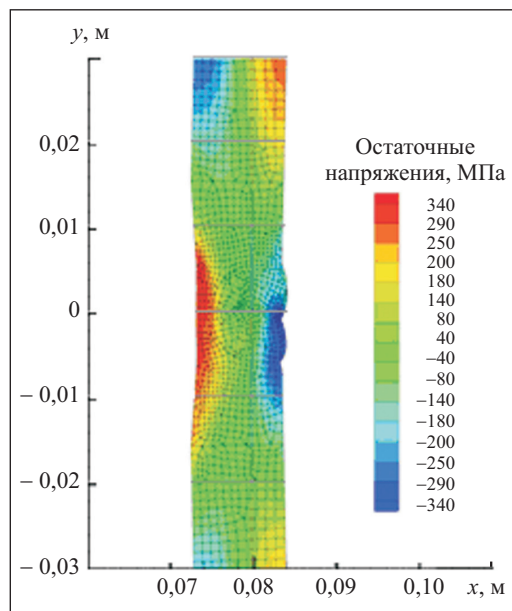


Рис. 2. Конечно-элементное моделирование остаточных напряжений и сварочных деформаций в сварном соединении после выполнения многопроходной сварки трубы большого диаметра (в продольном направлении)

Пакет FLUENT использован для решения 2D гидромеханической задачи формирования валика. Пакет Multiphysics применен для решения 3D термомеханической задачи (моделирование температурных полей и расчет остаточных напряжений в околошовных зонах сварных конструкций).

Как известно, при многопроходной сварке управление термическим циклом является одной из приоритетных задач. Цель такого управления — обеспечить заданные структурные изменения в зоне термического влияния [4—6]. Необходимый термический цикл достигается соответствующим выбором режима сварки и траектории перемещения сварочной горелки при наплавке каждого следующего слоя металла [9, 10]. Для реали-

зации автоматического управления многопроходной сваркой требуется решать обратную задачу [7, 11], позволяющую рассчитывать режим сварки для заданных параметров термоцикла и формы валика сварного шва.

В предлагаемом подходе для этой цели использована база данных, в которой хранятся результаты предварительно выполненных расчетов термомеханической и гидромеханической задач. При этом решаются следующие задачи:

- 1) синтез перемещаемого источника тепла, задаваемый в терминах параметров процесса МАГ сварки;
- 2) моделирование динамической термомеханической задачи;
- 3) моделирование гидромеханической задачи.

Моделирование задач 1 и 2 выполнено в рамках пакета Multiphysics, а задачи 3 — в пакете FLUENT.

Перемещаемый источник тепла задаем в виде функции времени, которую в качестве нагрузки (heat flux) прикладываем к свариваемому изделию. Решение термомеханической задачи, выполняемое после укладки каждого валика, представляет собой двухшаговый процесс: расчет тем-

температурного поля и последующий расчет остаточных напряжений и деформаций в сварном шве и околошовной зоне. Конечно-элементный метод расчета тепловой задачи, положенный в основу пакета Multiphysics, позволяет выполнить нелинейный расчет температурного поля зоны сварки с учетом переменных значений физических параметров стали, зависящих от температуры: теплопроводности и энтальпии. Учет переменных значений этих параметров позволяет адекватно смоделировать температурное поле и термоциклы, что обеспечивает достаточно точный расчет полей остаточных напряжений и сварочных деформаций.

Моделирование заполнения разделки выполнено в пакете Multiphysics с помощью механизма «birth and death», имитирующего формирование наплавляемого валика в процессе сварки с одновременным расчетом температурного поля в динамическом режиме. На следующем шаге моделирования рассчитываем остаточные напряжения и сварочные деформации (рис. 2).

Параметры поперечного сечения сварного валика (форма и высота) для конкретного режима и условий сварки рассчитаны в пакете FLUENT и сохранены в базе данных форм валиков. Численный метод расчета основан на следующих положениях:

- 1) концепция вязкости и турбулентной диффузии;
- 2) 2D модель многофазных жидких сплошных сред (подход Эйлера);
- 3) моделирование жидкого и затвердевшего состояний металла изменением вязкости;
- 4) метод дискретизации конечных объемов, основанный на гексаэдрных КЭ;
- 5) использование декартовой системы координат;
- 6) неявная процедура итерационного решения системы двух уравнений турбулентной k - ε -модели;
- 7) распараллеливание расчетных процессов.

Пакет FLUENT оперирует с КЭ ячейками Эйлера двухфазной среды, состоящей из газа и жидкости. Жидкое и затвердевшее состояния стали моделируются с помощью различных значений параметра сдвиговой вязкости. Уравнения турбулентного движения k - ε -модели рассчитываются отдельно для каждой фазы [12]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_q k_q) + \nabla(\bar{\rho}_q \mathbf{U}_q k_q) &= \nabla \left(\alpha_q \left(\mu_q + \frac{v_{t,q}}{\sigma_k} \right) \nabla k_q \right) + \alpha_q (G_{k,q} + G_{b,q}) - \bar{\rho}_q \varepsilon_q, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}_q \varepsilon_q) + \nabla(\bar{\rho}_q \mathbf{U}_q \varepsilon_q) &= \nabla \left(\alpha_q \frac{v_{t,q}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_q \right) + \frac{\varepsilon_q}{k_q} (G_{1\varepsilon} \alpha_q G_{k,q} - G_{2\varepsilon} \alpha_q \varepsilon_q), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_q — осредненное значение скорости q -й фазы; $\nu_{t,q}$ — коэффициент турбулентной вязкости q -й фазы; $G_{k,q}$ и $G_{b,q}$ — источники кинетической энергии турбулентности q -й фазы, связанные соответственно с градиентом скорости и силой гравитации; $G_{1\varepsilon}$, $G_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε — модельные константы.

Преимущества использования k - ε -модели следующие:

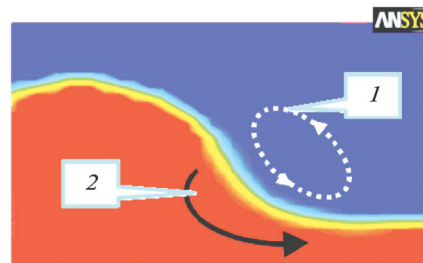
- а) надежное удержание глобального экстремума в процессе расчета, обусловленное осреднением мгновенной скорости;
- б) корректное поведение алгоритма расчета в переходных зонах с большим градиентом вязкости;
- в) учет сил гравитации и поверхностного натяжения на границе жидкой и газообразной фаз;
- г) устойчивая работа алгоритма расчета при больших значениях временного такта.

В результате моделирования получаем форму поперечного сечения частично расплавленных соседних валиков и наплавленного текущего валика (рис. 3), а также определяем проблемные зоны со сварочными дефектами. В качестве начальных условий принимаем результаты расчета температурного поля в области заполнения разделки на текущем временном шаге, выполненного в пакете Multiphysics, а также учитываем текущее значение скорости подачи присадочного металла.

Создание твердотельной модели звеньев манипулятора выполняется в блоке 6 (см. рис. 1), в который вводятся исходные данные из блока 1. В блоке 6 формируются запросы к базе данных (блок 7) и при наличии в ней моделей звеньев манипулятора, соответствующих заданным техническим требованиям, и модели свариваемого изделия из базы данных извлекается необходимая информация. В противном случае выполняется моделирование деталей и составление на их основе сборок, которые соответствуют заданной кинематической схеме. Результаты моделирования заносятся в базу данных 7.

Наиболее рациональным подходом к созданию трехмерной графической модели манипулятора является использование методики проектирования известной САПР. В данном случае выбрана система твердотельного параметрического проектирования механических узлов и конструкций Solid Works. Данная САПР позволяет реализовать сложные геометрические построения и располагает средствами для экспорта созданных изделий и сборок в форматы «step», «iges», «3ds», которые поддерживаются практически любыми существующими в настоящее время трехмерными графическими ядрами. Синтезированные трехмерная графическая модель свариваемого изделия и модель манипулятора (робота) передаются в блок визуализации 11.

Рис. 3. Моделирование процесса наложения галтельного шва: 1 — движение воздушных масс; 2 — движение масс расплавленного металла



Блок 11 представляет собой оригинальную разработку. В нем осуществляется проверка на синтезированных моделях решений прямой и обратной задач кинематики и динамики робота, корректности законов управления манипулятором и технологическим процессом, а также отображение перемещения сварочной горелки в реальном масштабе времени и заполнения разделки кромок присадочным металлом в процессе сварки. Графическое трехмерное представление робота и свариваемого изделия позволяет в наглядном виде отображать коллизии, которые представляют собой столкновения звеньев робота или сварочной горелки с элементами конструкции при имитации процесса перемещения сварочной горелки по спланированной траектории.

Блок визуализации 11 подготовлен в среде программирования MS Visual Studio с использованием библиотек графического ядра TrueVision. При создании графической модели манипулятора с заданной кинематической структурой использован подход, основанный на суперпозиции движения отдельных звеньев, когда движение предыдущего звена вызывает движение всех последующих звеньев. Этот подход реализуется с помощью встроенных функций графического ядра, которые позволяют описать каждое звено манипуляционной системы в виде узла древовидного графа и установить связь с соседними узлами.

Кроме того, графическое ядро TrueVision содержит библиотеки математических и физических функций, позволяющих смоделировать работу датчика обратной связи — ЛТС и спрогнозировать ситуации столкновения сварочной горелки или звеньев манипулятора с изделием [13]. При моделировании видеокамеры, входящей в состав ЛТС, используются функции класса TV3DEngine/TVCamera, а для модели генератора световой плоскости и прогнозирования столкновений — функция класса TV3DEngine/TVScene (AdvancedCollision). Пример графической трехмерной модели сварочного манипулятора с датчиком обратной связи и модель свариваемого изделия представлены на рис. 4.

Модель объекта управления (блок 10 на рис. 1) представляет собой систему, состоящую из моделей кинематики и динамики манипулятора и

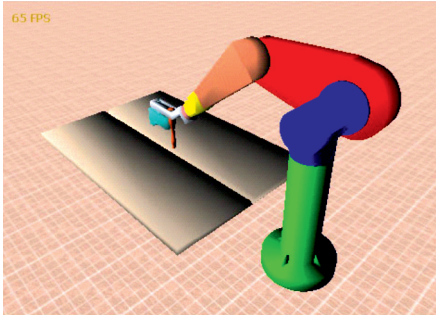


Рис. 4. Графическая модель манипулятора с датчиком обратной связи — ЛТС и модель свариваемого изделия

модели формирования сварного шва. В основу математического обеспечения решения прямой задачи кинематики положен матричный метод Денавита—Хартенберга, а в основу обратной задачи — геометрический подход совместно с матричным методом.

Метод Денавита—Хартенберга основан на составлении универсальной матрицы, которая позволяет описать взаимное положение систем координат i и $(i-1)$ для двух соседних звеньев манипулятора. Эта матрица имеет вид

$$A_i = A_{\theta_i} A_{s_i} A_{a_i} A_{\alpha_i} = \begin{bmatrix} \alpha(i) & r_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где A_{θ_i} , A_{s_i} , A_{a_i} , A_{α_i} — матрицы, характеризующие четыре преобразования, необходимые для совмещения систем координат i и $(i-1)$. Преобразования выполняются над системой координат $(i-1)$ в следующем порядке: поворот вокруг оси $O_{i-1}z_{i-1}$ на угол θ_i ; перенос вдоль оси $O_{i-1}z_{i-1}$ на величину s_i ; перенос вдоль оси $O_i x_i$ на величину a_i ; поворот вокруг оси $O_i x_i$ на угол α_i .

Результирующая матрица зависит только от одной обобщенной координаты q_i (угла θ_i — для кинематической пары вращательного типа или смещения s_i — для кинематической пары поступательного типа), которая определяет положение и ориентацию системы координат текущего звена относительно предыдущего. Положение определяет радиус-вектор r_i , а ориентацию — матрица направляющих косинусов $\alpha(i)$.

Результат произведения матриц относительных преобразований $A_{0n} = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$ определяет положение и ориентацию сварочной горелки в неподвижной системе координат $Ox_0y_0z_0$, связанной с основанием манипулятора.

Математическое обеспечение для синтеза уравнений динамики манипулятора основано на уравнениях Лагранжа с использованием аналитического и алгоритмического способов составления этих уравнений при

заданных динамических характеристиках и кинематической структуре. Уравнения Лагранжа второго рода для голономной системы с n степенями свободы, которым соответствуют обобщенные координаты q_i ($i=1, \dots, n$), имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_{j\partial}, \quad j=1, \dots, n, \quad (3)$$

где $L=(T-P)$ — функция Лагранжа, равная разности кинетической T и потенциальной P энергии системы; $Q_{j\partial}$ — обобщенные силы управляющих приводов, приведенные к j -й обобщенной координате (они имеют размерность моментов, если q_j — угол поворота, или сил, если q_j — линейное перемещение).

В математической модели ЛТС для преобразования изображений используется матричная алгебра таких операций, как вращение, сдвиг, перспективное преобразование и др. Математическое обеспечение позволяет определять пространственные координаты точек разделки свариваемого изделия в реальном масштабе времени по двумерному изображению объекта, поступающему от ЛТС. Входными данными для моделирования являются параметры объектива видеокамеры и взаимного расположения лазерного генератора световой плоскости и видеокамеры.

Блок 8 (см. рис. 1) предназначен для оптимальной послойной раскладки валиков и планирования траектории сварки. Входными данными для расчета являются данные о геометрии свариваемого изделия, поступающие из блока 7, и геометрические параметры наплавляемого валика, поступающие из блока 4.

Автоматическое управление многопроходной МАГ сваркой реализовано в блоке 9, где выполняется расчет управляющих сигналов для манипулятора сварочной горелки и сварочного оборудования. Основная задача управления манипулятором — реализация контурного управления, т.е. выработка таких управляющих воздействий для его звеньев, которые обеспечивают равномерное перемещение сварочной горелки с заданной скоростью по спланированной траектории. Расчет управления положением манипулятора выполняется на основе решения задачи кинематики с учетом динамических уравнений движения манипулятора, параметры которых считываются из блока 10. Основная задача управления режимом сварки состоит в том, чтобы обеспечить заданные геометрические параметры сварного шва при воздействии сварочных возмущений и определенных ограничениях на динамику управляющих воздействий. С этой целью применяется оптимальный стохастический регулятор с обратной связью [14], сигнал которой формируется датчиком ЛТС в блоке 10.

Выводы

Предложенный подход к созданию комплекса моделирования роботизированной многопроходной многослойной автоматической МАГ сварки обеспечивает полный цикл создания АСУ технологическим процессом — от имитационного моделирования до прогонки алгоритмов управления процессом сварки, которые реализуют технологическую и геометрическую адаптацию.

Разработанный комплекс моделирования МАГ сварки, очевидно, может развиваться в таких направлениях:

- уточнение математических моделей процесса дуговой сварки и алгоритмов управления;
- расширение базы данных по элементам геометрической модели манипулятора и свариваемого изделия;
- расширение базы данных сортов свариваемых сталей и соответствующих им режимов сварки, геометрии сварных швов, термических циклов, полей остаточных напряжений и сварочных деформаций.

A complex of mathematical and imitation modeling of automatic control system for the robotized multipass welding has been developed which structurally consists of databases used for the control inverse problem decision. Their composition is formed on the basis of numerical modeling results in the system universal program environment of ANSYS finite element analysis. An optimal stochastic regulator with feedback is applied in the multipass welding control algorithm the feedback signal being formed by laser-television sensor.

1. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением* /Под ред. акад. НАН Украины Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974.— 768 с.
2. *Горбач В. Д., Суздаев И. В., Кисилевский Ф. Н.* Повышение качества и надежности сварных конструкций путем адаптивного управления технологическим процессом сварки // Судостроение. — 2002. — № 1. — С.12—17.
3. *Горбач В. Д.* Автоматизация дуговой сварки плавящимся электродом судовых конструкций // Сварочное производство. — 2003. — № 95. — С. 8—15.
4. *Судник В. А., Рыбаков А. С.* Автоматизация проектирования технологии высокоскоростной двухдуговой сварки труб из нержавеющей стали // САПР ТП сварки, пайки, литья и нанесения газотермических покрытий. — М.: МДНТП, 1985, — С. 50—61.
5. *Судник В. А.* Теплофизические математические модели и автоматизированное проектирование технологических процессов сварки плавлением / Теплофизика технол. процессов. — Ташкент: ТашПИ, 1984. — Ч.2. — С. 69—72.
6. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Махненко О. В. и др.* Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых стыков труб // Автоматическая сварка. — 2000. — № 5. — С.3—8.
7. *Попков А. М.* Расчет параметров режима дуговой сварки стыковых соединений по заданным геометрическим параметрам швов // Сварочное производство. — 2003. — № 9. — С. 33—35.
8. *Кисилевский Ф. Н., Коляда В. А.* Система лазерного слежения за валиком усиления сварного шва // Автоматическая сварка. — 2006. — № 1. — С. 60 — 62.

9. Пономарева И. Н. Остаточные сварочные напряжения при многопроходной сварке кольцевых стыков трубопроводов // Сварочное производство.— 2009. — № 1. — С. 7—11.
10. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А. Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств // Автоматическая сварка.— 2001.— № 1. — С. 3—10.
11. Судник В. А., Ерофеев В. А. Обратная имитация сварочных процессов как метод технологической подготовки производства // Изв. Тульск. гос. ун-та. Компьютерные технологии в соединении материалов. — 2005. — № 3. — С. 48—60.
12. Cokljat D., Slack M., Vasquez S. A. Reynolds-Stress Model for Eulerian Multiphase. Editors Y. Nagano, K. Hanjalic, M. J. Tummers. Proc. of the 4th International Symposium on Turbulence Heat and Mass Transfer. Begell House Inc.— 2003. — P. 1047—1054.
13. Градовцев А. А. Методика компьютерного моделирования движения бортового манипулятора по законам, вырабатываемым многопроцессорной системой управления // Искусственный интеллект. — 2003. — № 2. — С. 65—70.
14. Долинченко В. В., Коляда В. А., Скуба Т. Г., Шаповалов Е. В. Оптимальное управление формированием валика сварного шва // Автоматическая сварка.— 2010. — № 2. — С. 23—29.

Поступила 08.10.10

ШАПОВАЛОВ Евгений Викторович, канд. техн. наук, руководитель отдела Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В 1999 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — создание перспективных образцов лазерно-триангуляционных видеосенсоров и регуляторов с обратной связью, неразрушающий контроль качества сварных швов.

ДОЛИНЧЕНКО Владимир Владимирович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В 1979 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — оптимальное управление дуговой сваркой, численное моделирование термомеханической и гидромеханической задач.

КОЛЯДА Владимир Александрович, канд. техн. наук, науч. сотр. Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В 2002 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — создание имитационных моделей видеосенсоров, разработка математического обеспечения для видеосенсоров, решение прямой и обратной задач кинематики манипуляторов.

СКУБА Тарас Григорьевич, инженер-программист Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В 2002 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — имитационное моделирование манипуляторов, математическое моделирование в пакете MATLAB, структурное проектирование АСУ.

