ЗАДАЧА СНИЖЕНИЯ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ БРАКОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Д. С. Фоминых

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия
E-mail: dm_fominyh@mail.ru

В статье описаны модели и алгоритмы управления процессом сварки в роботизированных технологических комплексах для снижения риска отклонений в качестве продукции. Предлагается решение задачи путем минимизации целевой функции, характеризующей отклонения основных показателей качества технологического процесса. Это делается с помощью классического аппарата вариационного исчисления, основанного на нахождении экстремума функционала. В качестве исходных данных использовались фактические и плановые значения показателей качества технологического процесса. По разработанному алгоритму получены планы мероприятий, обеспечивающие минимальное отклонение фактических значений от целевых.

THE TASK OF REDUCING THE RISK OF DEFECTIVE PRODUCTS IN THE WELDING PROCESS WITH ROBOTIC COMPLEXES

D. S. Fominykh

The article describes models and algorithms for controlling the welding process in robotic technological complexes to reduce the risk of deviations in product quality. The solution of the problem by minimizing the objective function which characterizes the deviations of the main indicators of the quality of the technological process is proposed. This is done by using the classical apparatus of the calculus of variations based on finding the extremum of the functional. The actual and planned values of the quality indicators of the technological process were used as the initial data. According to the developed algorithm, action plans were obtained that ensure the minimum deviation of the actual values from the planned ones.

В связи со стремительным развитием технологий и растущей конкуренцией одной из основных проблем промышленных предприятий является обеспечение качества продукции. В ходе сварки металлоконструкций с использованием роботизированных технологических комплексов (РТК) вопрос качества является приоритетным, ведь главная цель использования сварочных роботов – повышение производительности труда и качества продукции. Недостаточный уровень контроля во время процесса по какой-либо причине увеличивает риск брака продукции. В настоящее время разработаны и испытаны на практике различные системы управления РТК. Они сосредоточены на таких проблемах, как качество сварки трением с перемешиванием, отслеживание пути сварки, сварка с дистанционным управлением, оптимизация скорости робота, качество проплавления шва и т.д. [1–5]

При этом недостаточное внимание уделяется оптимизации оперативного управления процессом сварки с учетом не только всех параметров технологического процесса, но также человеческого фактора и внешних воздействий, влияющих на качество выпускаемой продукции.

Эти обстоятельства определяют актуальность и практическую значимость данной статьи, содержащей разработку моделей и алгоритмов управления процессом сварки в РТК по критерию, позволяющему минимизировать риск отклонения в качестве продукции.

Постановка задачи выглядит следующим образом: разработать математические модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале $[t_0, t_1]$ для любых допустимых значений вектора состояний $\mathbf{v}(t)\in\mathbf{V}$ среды найти вектор управляющих воздействий на РТК $\mathbf{u}(t)\in\mathbf{U}$, позволяющих минимизировать целевую функцию

$$Q(t) = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{n} (\tilde{X}_i - X_i(t))^2 \omega_i \, dt \to min \qquad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} \boldsymbol{L_j(t, v, v', u, u') \geq 0,\ j = 1, \ldots, m_1,} \\ \boldsymbol{L_j(t, v, v', u, u') < 0,\ \ j = m_1 + 1, \ldots, m_2} \end{cases}$$

и граничных условиях

$$\begin{cases} L_j^{(t_0)}(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{v}', \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u}') = 0,\ j = m_3, \ldots, m_4, \\ L_j^{(t_1)}(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{v}', \boldsymbol{v}, \boldsymbol{v}') = 0,\ j = m_4 + 1, \ldots, m_5 \end{cases}$$

где $\widetilde{X}_i$, X_i, $i = 1, 2, \ldots, n$ – соответственно, целевые и фактические значения показателей качества процесса сварки; ω_i – весовой коэффициент i-го показателя, $m_1 \ldots n_5$ – заданные константы.

Основные показатели качества процесса сварки с использованием РТК (количество дефектных балок на 100 шт., средняя длина дефектных сварных швов на единицу продукции, среднее отклонение напряжения сварочной дуги) были сформулированы в [6–9]. Там же предложено решение задачи (1) с использованием модели динамики системы, позволяющей построить дифференциальные уравнения для основных фазовых переменных. Несмотря на ряд очевидных преимуществ, системное динамическое моделирование имеет ряд ограничений, связанных в первую очередь с точностью моделирования и сложностью оценки его погрешности. В данной статье предлагается разработать математическую модель для получения аналитического решения задачи (1). В связи с тем, что решение задачи заключается в нахождении минимума целевой функции, целесообразно использовать классический аппарат вариационного исчисления, основанный на нахождении экстремума функционалов.

Таким образом, задача (1) сводится к вариационной задаче нахождения условного экстремума, и для ее решения необходимо найти экстремаль функционала:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} F(X_1(t), X_2(t), \ldots, X_n(t)) dt,$$

$$F(X_1(t), X_2(t), \ldots, X_n(t)) = \sum_{i=1}^{n} (\tilde{X}_i - X_i(t))^2 \omega_i.$$

Для решения проблемы воспользуемся методом множителей Лагранжа. Согласно [10], необходимо ввести новый функционал:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_1} \tilde{F}(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))dt,$$

$$\tilde{F}(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)) = F(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)) + \sum_{j=1}^{m} \lambda_j \phi_j$$

где λ_j, j=1,2,..,m – множители Лагранжа, φ_j – уравнения связи.

Необходимые условия наличия экстремума задаются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{F}}{\partial X_i} = 0, \ i = 1,2, \dots n \\ \phi_j = 0, \ j = 1,2, \dots m \end{cases} \qquad (2)$$

В качестве уравнений связи используются приближенные функциональные зависимости между показателями, полученные в [6, 8]. Тогда система уравнений (2) примет следующий вид:

$$|A_1 A_2 \quad \dots \quad A_{18} \qquad \phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_{34}|^T = 0$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{vmatrix} -2\tilde{X}_2\omega_2 + 2X_2\omega_2 + 2{,}46X_2\lambda_5 - 3{,}22\lambda_5 + 0{,}15X_2^2\lambda_{13} - 1.52X_2\lambda_{13} + 4{,}74\lambda_{13} \\ \dots \\ -2\tilde{X}_{18}\omega_{18} + 2X_{18}\omega_{18} + \lambda_{29} + \lambda_{30} + \lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} + \lambda_{34} \end{vmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{vmatrix} X_1 + 0{,}36X_{11}^3 - 1{,}74X_{11}^2 + 0{,}09X_{11} - 1{,}13 \\ \dots\dots \\ X_{18} + 1{,}08X_4^3 - 1{,}14X_4^2 + 0{,}74X_4 - 0{,}98 \end{vmatrix}$$

Матрицы **A** и **Ф** приведены не полностью во избежание громоздкости.

Решив систему уравнений (2), получим точки экстремума функционала $\tilde{F}(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))$.

Чтобы определить, являются данные точки условным минимумом или условным максимумом, используем методики согласно [10].

Управляющие воздействия реализуются в виде планов мероприятий $\{u_1, u_2, \dots u_m\}$, каждый из которых для удобства представлен в виде фрейма:

<*name*; (*Act*$_1$; *R_ex*$_1$; *Pl*$_1$; *T*$_1$); … (*Act*$_M$; *R_ex*$_M$; *Pl*$_M$; *T*$_M$)>,

где слот *name* – наименование плана; слот *Act*$_i$ – описание i-го мероприятия; слот *R_ex*$_i$ ответственный за выполнение i-го мероприятия плана; слот *Pl*$_i$ место выполнения i-го мероприятия; слот T_i – время на выполнение (периодичность) i-го мероприятия, i = 1, 2, … M.

На основе экспертных оценок были аппроксимированы в виде полиномов второй степени зависимости показателей качества X_1, X_2, …, X_{18} от реализации каждого плана мероприятий:

$$X_i(u,t) = \begin{cases} a_1^{(i)}t^2 + b_1^{(i)}t + c_1^{(i)}, \text{если } u = u_1; \\ a_2^{(i)}t^2 + b_2^{(i)}t + c_2^{(i)}, \text{если } u = u_2; \\ \dots \\ a_m^{(i)}t^2 + b_m^{(i)}t + c_m^{(i)}, \text{если } u = u_m; \end{cases}$$

Таким образом, искомым вектором управляющего воздействия будет тот план мероприятий, который обеспечит наименьшее отклонение $X_i(u,t)$ от $X_i^*(t)$, являющихся решением системы уравнений (4). Для этого введём метрику:

$$\Omega(u_k) = \sum_{i=1}^{18} |X_i(u_k,t) - X_i^*(t)|\, \omega_i \qquad (5),$$

Тогда план мероприятий $u*$ будет являться решением задачи (1), если для него выполняется следующее условие:

$$\forall i \in [1, m] \Rightarrow \Omega(u_i) \geq \Omega(u*).$$

Вычисляя последовательно $\Omega(u_k)$ для $k = 1, 2, \ldots, m$, выбираем тот план мероприятий, которому соответствует минимальное значение $\Omega(u_k)$.

В качестве примера зададим целевые значения показателей качества, установив их веса (табл. 1).

Таблица 1

Целевые значения показателей качества и их веса

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}
$\widetilde{X}_i$	0,07	0,50	0,10	0,50	0,98	0,55	0,85	0,90	0,30	0,25	0,20	0,30	0,60	0,97	0,30	0,60	0,95	0,90
ω_i	0,14	0,07	0,02	0,05	0,03	0,04	0,02	0,06	0,02	0,07	0,03	0,07	0,04	0,06	0,06	0,04	0,08	0,10

Подставляя константы и ω_i и решив систему уравнений (4), получим значения показателей, при которых функция $Q(t)$ принимает минимальное значение с учётом ограничений:

$X_1 = 0{,}075$; $X_2 = 0{,}613$; $X_3 = 0{,}29$; $X_4 = 0{,}379$; $X_5 = 0{,}869$; $X_6 = 0{,}661$;
$X_7 = 0{,}773$; $X_8 = 0{,}849$; $X_9 = 0{,}275$; $X_{10} = 0{,}318$; $X_{11} = 0{,}37$; $X_{12} = 0{,}303$;
$X_{13} = 0{,}688$; $X_{14} = 0{,}933$; $X_{15} = 0{,}215$; $X_{16} = 0{,}512$; $X_{17} = 0{,}948$; $X_{18} = 0{,}955$.

Теперь необходимо найти план мероприятий, приводящий показатели качества к данным значениям. На основании многолетних наблюдений за объектом управления были сформированы зависимости показателей $X_1, X_2, \ldots, X_{18}$ от планов мероприятий $u_1, u_2, \ldots, u_6$. Например, зависимость показателя X_1 («Количество забракованных балок на 100 единиц продукции») от плана мероприятий выглядит следующим образом:

$$X_1(u,t) = \begin{cases} -0{,}003t^2 + 0{,}015t + 0{,}077, \text{если } u = u_1; \\ -0{,}003t^2 + 0{,}01t + 0{,}095, \text{если } u = u_2; \\ -0{,}017t + 0{,}137, \text{если } u = u_3; \\ -0{,}003t^2 - 0{,}006t + 0{,}131, \text{если } u = u_4; \\ -0{,}003t^2 - 0{,}0058t + 0{,}149, \text{если } u = u_5; \\ -0{,}003t^2 + 0{,}0045t + 0{,}113, \text{если } u = u_6 \end{cases}$$

Будем находить минимальные значения $\Omega\,(u_i)$ в разные моменты времени для определения плана мероприятий. Расчёты производились на интервале t=[0;1], соответствующему периоду в 1 месяц. Результаты вычислений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Выбор плана мероприятий на временном интервале

t	$\Omega(u_1)$	$\Omega(u_2)$	$\Omega(u_3)$	$\Omega(u_4)$	$\Omega(u_5)$	$\Omega(u_6)$
0,1	0,023	0,034	0,102	0,017	0,073	0,026
0,2	0,026	0,093	0,151	0,027	0,053	0,029
0,3	0,052	0,063	0,122	0,027	0,044	0,046
0,4	0,003	0,103	0,161	0,086	0,102	0,016
0,5	0,082	0,122	0,131	0,115	0,171	0,065
0,6	0,072	0,005	0,112	0,056	0,102	0,035
0,7	0,101	0,024	0,171	0,043	0,161	0,006
0,8	0,111	0,014	0,171	0,007	0,142	0,065
0,9	0,072	0,093	0,082	0,115	0,102	0,114
1	0,121	0,054	0,082	0,086	0,122	0,095

Как видно из таблицы 2, на интервале времени [0;0,3] оптимальным является план мероприятий u_5, на интервале [0,4;1] – план u_6. Учитывая близость значений $\Omega(u_5)$ и $\Omega(u_6)$ на интервале [0;0,3], можно принять план u_6 в качестве вектора управляющих воздействий на весь предстоящий месяц. Фрагмент фрейма, соответствующего данному плану, представлен ниже:

<u_6; (*Промежуточный контроль качества сварного шва; Оператор РТК; Сборочно-сварочный цех; Ежесменно*); (*Проверять актуальность технологической документации на рабочих местах; Технолог; Сборочно-сварочный цех; Ежедневно*); (*Мониторинг значений сварочного тока по индикаторам источника питания во время сварки изделия; Оператор РТК; Сборочно-сварочный цех; Каждый час*); (*Внеплановое техническое обслуживание РТК; Наладчик сварочного оборудования; Сборочно-сварочный цех; В течение недели*); (*Принять на работу еще одного программиста; Инспектор по кадрам; Отдел кадров; В течение месяца*)>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dinham M., Fang G.* Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2013. № 29 (5). P. 288-301.

2. *Ericsson M., Nylén P.* A look at the optimization of robot welding speed based on process modeling // Welding Journal. 2007. Vol. 86 (8).

3. *Ryberg A., Ericsson M., Christiansson A. K., Eriksson K., Nilsson J., Larsson M.* Stereo vision for path correction in off-line programmed robot welding // In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. 2010. P. 1700–1705.

4. *Shultz E. F., Cole E. G., Smith C. B., Zinn M. R., Ferrier N. J., Pfefferkorn F. E.* Effect of compliance and travel angle on friction stir welding with gaps // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. 2010. № 132 (4). P. 0410101–0410109.

5. *Stenberg T., Barsoum Z., Astrand E., Oberg A. E., Schneider C., Hedegard J.* Quality control and assurance in fabrication of welded structures subjected to fatigue loading // Welding in the World. 2017. № 61 (5). P. 1003–1015.

6. *Fominykh D. S. Kushnikov V. A. Rezchikov A. F.* Control of the Welding Process in Robotic Technological Complexes Using the System Dynamics Model. 1-6. 10.1109.

7. *Fominykh D. S., Kushnikov V. A., Rezchikov A. F.* Prevention unstable conditions in the

welding process via robotic technological complexes // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224.

8. *Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Фоминых Д. С., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю.* Модели и алгоритмы управления процессом сварки роботизированными технологическими комплексами по критерию качества производимой продукции // Управление большими системами. 2018. Вып. 71. С. 98–122.

9. *Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Фоминых Д. С., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю.* Управление процессом сварки в роботизированных технологических комплексах по критерию качества продукции в условиях риска возникновения нестабильных состояний // Системы управления и информационные технологии. 2017. № 3 (69). С. 65–73.

10. *Dan K.* Leveling with Lagrange: An Alternate View of Constrained Optimization // Mathematics Magazine. 2009. Vol. 82 (3). P. 186–196.