

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ СВАРКЕ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.О. Курашкин, В.С. Тынченко, Д.В. Рогова (СибГУ им. М.Ф. Решетова)

Рассматривается задача автоматизации ввода луча при электронно-лучевой сварке (ЭЛС). Представлены алгоритмы управления вводом электронного луча и оптимизации режима ввода луча. Предложенные алгоритмы являются ядром разработанной на их основе АСУ процессом ЭЛС. Работоспособность предложенной системы проверена при проведении экспериментальной ЭЛС для изделия титанового сплава BT-14 толщиной 1,2 мм¹.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, математическое моделирование, тепловые процессы, оптимизация параметров технологического процесса, ввод/вывод электронного луча.

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) используется в аэрокосмической отрасли для соединения различных конструкций и узлов, изготовленных из металлов сплавов, в которых предъявляются повышенные требования к качеству сварного соединения. В настоящее время глубоко изучены вопросы выбора технологических параметров процесса ЭЛС, вопросы, связанные с физическими свойствами свариваемых материалов, вопросы управления электронным лучом [1, 2]. На сегодняшний день проблема получения высококачественных сварных соединений при помощи ЭЛС в большинстве случаев достигается путем экспериментального подбора режимов сварки на контрольных образцах [3, 4]. При этом для тонкостенных конструкций предъявляются повышенные требования, в частности, к глубине проплавления, которая даже при настроенном технологическом процессе может выходить за границы значений, установленных регламентирующими документами.

Основному этапу сварки в установившемся режиме предшествуют и его завершают этапы ввода/вывода луча. Практика показывает, что большое число дефектов возникает именно в так называемой нулевой

точке сварки — в том участке шва, где производился ввод/вывод луча [5, 6].

На данном этапе сварки важным является определение интенсивности увеличения тока электронного пучка, неправильная настройка которого может приводить к «расплескиванию» материала изделия, образованию газовых пор, а также искажению траектории сварного шва. Ввод/вывод луча осложняются возможным появлением таких дефектов как: газовые поры, непровар, корневые дефекты, при выборе неправильной скорости и формы управления током луча на данном этапе [7, 8]. Результаты моделирования на этапе ввода луча представлены на рис. 1.

Для правильного выбора скорости и формы нарастания тока пучка необходимо проводить математическое моделирование распределения энергии ввода луча с целью снижения экономических затрат на отработку технологического процесса ЭЛС. Программная реализация модуля, обеспечивающего математическое моделирование, и включение его в состав автоматизированной системы управления ЭЛС позволит существенно повысить повторяемость процесса ЭЛС, а также снизить влияние человеческого фактора на качество производимых предприятиями изделий.

В работе представлен алгоритм управления вводом электронного луча (рис. 2). На первом этапе производится задание теплофизических параметров: теплоемкость материала (λ), коэффициент температурного расширения (α), удельная теплоемкость материала (C), плотность материала (ρ).

На следующем этапе необходимо ввести параметры сварки, полученные на предыдущих этапах моделирования и протестированные на натуральных экспериментах: V — скорость сварки; t — время интегрирования; h — толщина и l — длина изделия; U — ускоряющее напряжение; I — ток луча; I_F — ток фокусировки; D_B — диаметр луча. Далее задаются начальные значения тока луча и времени равные нулю.

Основной блок управления вводом луча выполняет расчет оптимального значения $I(x)$ — функции, в соответствии

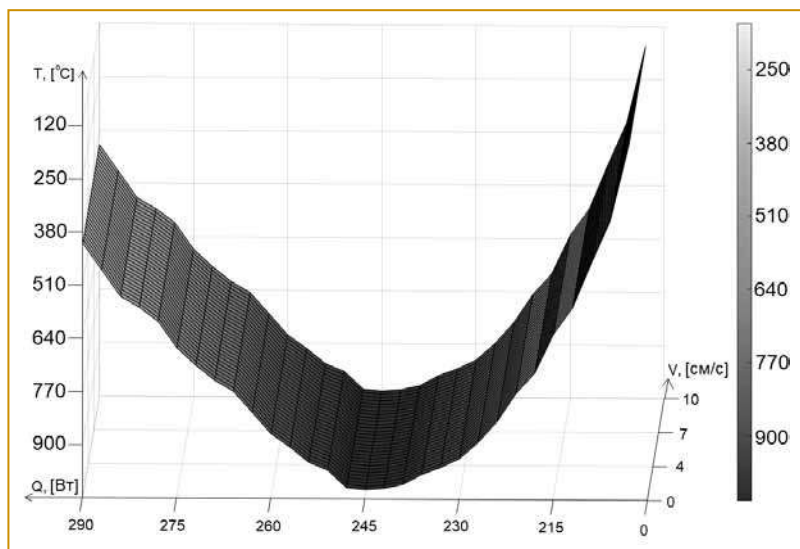


Рис. 1. График распределения температуры для титанового сплава BT-14 при заданных режимах ввода электронного луча

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Краевого фонда науки в рамках научного проекта № 19-48-240007 «Математическое и алгоритмическое обеспечение процесса электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций аэрокосмического назначения».

с которой будет постепенно вводиться электронный луч. В рамках настоящего исследования данная функция в общем виде может иметь одну из трех форм: линейная, параболическая и перевернутая параболическая. В соответствии с рассчитанной функцией $I(x)$ производится дискретный ввод энергии, причем дискретизация обеспечивается за счет использования пауз интервалом Δt (рис. 2).

На первом этапе алгоритма оптимизации режима ввода луча производится математическое моделирование расчета теплового поля (рис. 3.) Далее на схеме представлены три подпроцесса, в которых производится поиск значений $t_{уст}$, а именно $t_{уст}^{лин}$ — установившееся время линейной функции формы ввода, $t_{уст}^{кв1}$ — установившееся время квадратичной функции формы ввода со снижением интенсивности, $t_{уст}^{кв2}$ — установившееся время квадратичной функции формы ввода с повышением интенсивности.

Далее из этих переменных выбирается минимальное значение, которое обозначается как $t_{уст}^{опт}$. Результатом работы алгоритма являются значение функции $I(x)$ и оптимального установившегося времени $t_{уст}^{опт}$.

Задача оптимизации решалась в следующем виде:

$$\begin{cases} t_{уст} \rightarrow \min, \\ \sum_{p_i \in S_{out}} Q_{p_i} = 0, \\ t_{уст} \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

где $t_{уст}$ — время достижения установившегося процесса; p_i — точка в зоне нагрева; Q_{p_i} — количество вводимой энергии в точке.

Для решения задачи оптимизации с одной переменной можно применять методы нулевого, первого либо второго порядка. Однако в связи с особенностями целевой функции и ограничениями целесообразно применять методы нулевого порядка. В рамках настоящего исследования был выбран метод золотого сечения с границами интервала неопределенности $t_{уст} \in [0, 5]$.

Описание разработанного программного обеспечения

На рис. 4 изображена структурно-функциональная схема АСУ процессом ЭЛС. Система включает

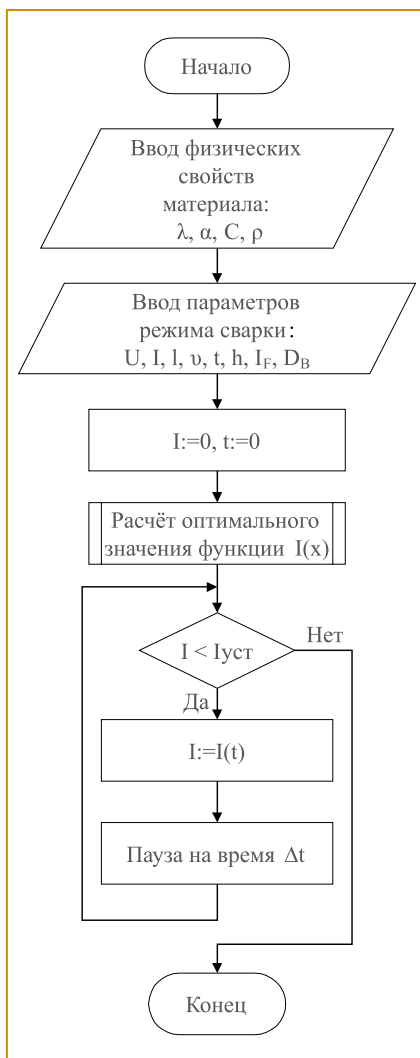


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления вводом электронного луча

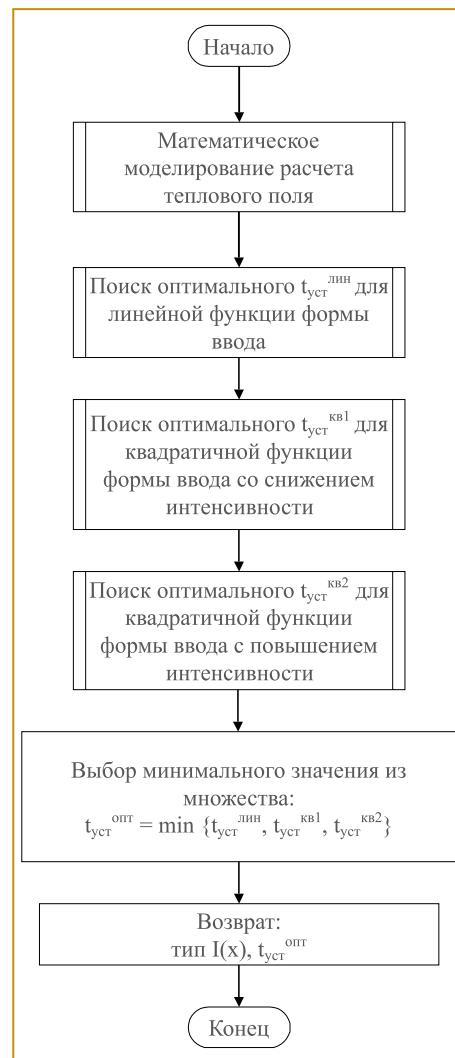


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оптимизации режима ввода луча

модуль программного интерфейса, отображающий текущие значения, полученные с датчиков (ускоряющее напряжение, ток накала, ток фокусировки, ток луча, скорость сварки). В модуле моделирования производится вычисление температурного поля при заданных параметрах сварки. В модуле оптимизации производится корректировка формы ввода луча на основе данных, полученных из модуля моделирования. Модули программного управления и управления аппаратным обеспечением выполняют программное и аппаратное управление процессом сварки.

На рис. 5 показаны функциональные возможности, предоставляемые АСУ процессом ЭЛС.

Функциональность системы разделена между двумя типами пользователя:

- технолог, который осуществляет технологическую подготовку производства изделий на предприятии;
- оператор установки ЭЛС, непосредственно осуществляющий процесс сварки.

Разграничение прав доступа реализовано посредством стандартной системы авторизации на базе логина и хранящегося в зашифрованном виде пароля.

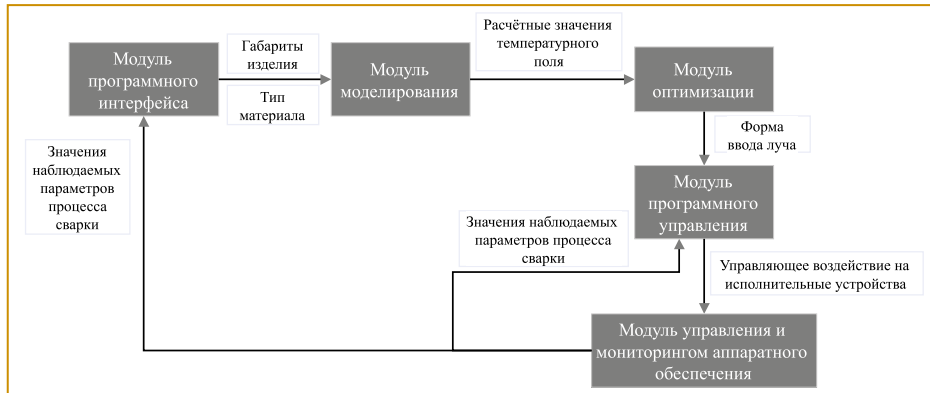


Рис. 4. Структурно-функциональная схема АСУ процессом сварки

2) остановка процесса сварки в случае возникновения внештатной ситуации;

3) мониторинг параметров процесса сварки, при котором оператору предоставляется информация о текущих значениях (ускоряющее напряжение, ток накала, ток фокусировки, ток луча, скорость сварки).

Технологу программной системы доступны функции:

1) ввод параметров процесса ЭЛС (ток луча, ток фокусировки, скорость сварки, время вывода);

2) ввод габаритов изделия: длина и толщина;

3) выбор материала, из которого изготовлено изделие. В базовом варианте программной системы предварительно внесена информация по двум материалам: титановый сплав ВТ-14 и алюминиевый сплав АМг-6. Список материалов может быть расширен технологом;

4) сохранение параметров технологического процесса в информационной базе;

5) загрузка параметров технологического процесса из информационной базы;

6) оптимизация режима ввода электронного луча с использованием предлагаемой модели (формула (1)), расчеты по которой выполняются в соответствии с алгоритмом (рис. 3);

7) вся функциональность, доступная оператору для отработки технологического процесса.

На рис. 6 представлено главное окно разработанной программной системы. В верхней части рабочего окна пользовательского интерфейса автоматизированной системы представлены элементы, позволяющие осуществлять мониторинг текущих значений параметров технологического процесса ЭЛС. Данная информация поступает в систему по каналу обратной связи с установкой ЭЛС по средствам платы сбора данных PCI-1710. В левой нижней части рабочего окна расположены элементы управления для запуска и остановки процесса ЭЛС.

Установка значений параметров технологического процесса, габаритов и материала изделия доступны для технолога в центральной и правой части рабочего окна, и реализованы по средствам выпадающих списков и изменяемых текстовых полей. Запуск процесса оптимизации режима ввода электронного луча

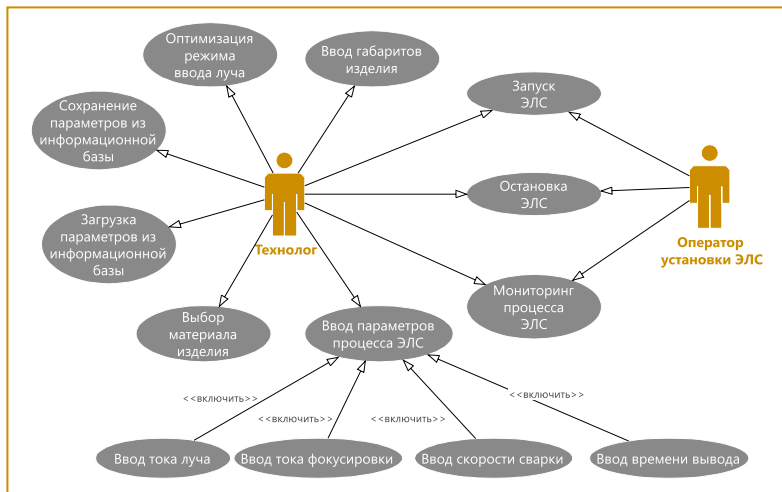


Рис.5. Диаграмма вариантов использования программы управления процессом сварки

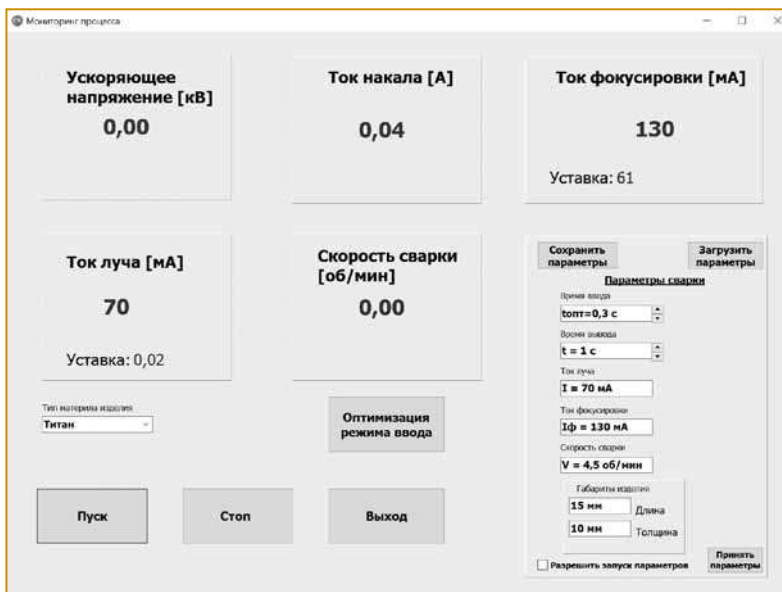


Рис. 6. Главное окно программной системы

Оператору установки ЭЛС доступно три базовые функции:

1) запуск процесса сварки, параметры которого установлены технологом;

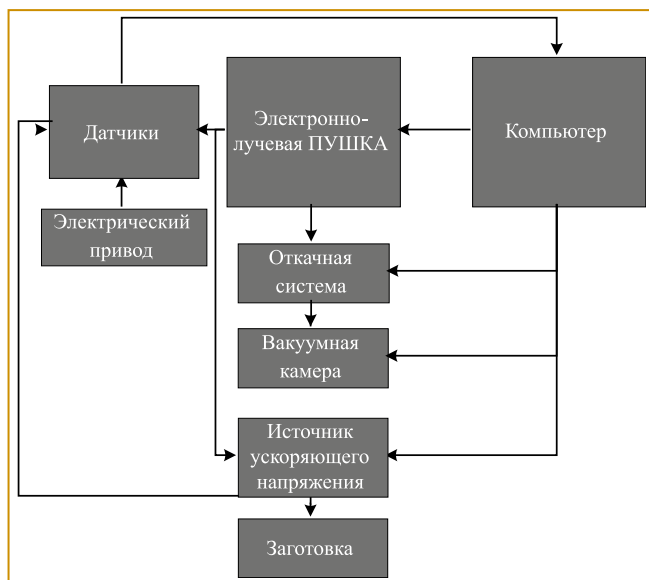


Рис. 7. Схема эксперимента

осуществляется по нажатию кнопки «Оптимизация режима ввода». При этом в качестве времени ввода будет установлена значение, рассчитанное в соответствии с предлагаемой моделью оптимизации.

Экспериментальные исследования

Разработанная АСУ процессом ЭЛС применялась при оптимизации режима ввода электронного луча для изделия титанового сплава ВТ-14 толщиной 1,2 мм. Эксперименты проводились на оборудовании со следующими характеристиками:

- 1) электронно-лучевую пушка;
- 2) источник ускоряющего напряжения на 20 кВ;
- 3) управляемый электрический привод высокоточного позиционирования для манипулятора;
- 4) вакуумная камера с системой вакуумирования;
- 5) турбомолекулярную откачную систему МТ-Turbo 65D/0/8 KF40M МТМ;
- 6) система дифференциальной откачки воздуха;
- 7) вакуумный затвор с электромагнитным приводом ISO63.

На рис. 7. изображена упрощенная схема эксперимента. На компьютере установлено программное обеспечение, реализующее предложенные алгоритмы.

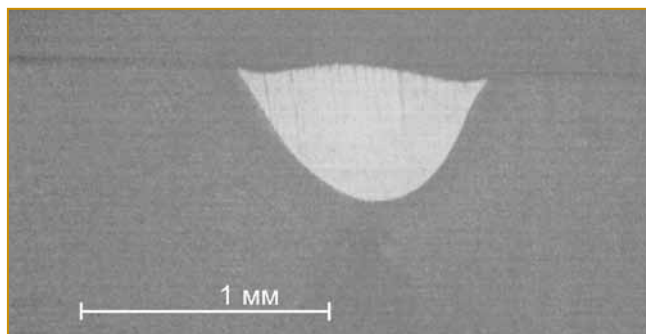


Рис. 8. Микрошлиф сварного шва в середине зоны ввода луча

Компьютер также является автоматизированным рабочим местом оператора, через которое осуществляется управление сваркой технологом и оператором. Данные на компьютер поступают с датчиков и выводятся в программе в соответствующем виде. На схеме изображены вакуумная камера, в которой производилась сварка, откачивающая система для создания вакуума и электрический привод, при помощи которого регулировалась скорость сварки.

В результате оптимизации режима ввода электронного луча было получена оптимальная функция формы ввода — квадратичная со снижением интенсивности (перевернутая параболическая функция), а t_{ycm}^{opt} принимало значение 0,8 с.

Остальные технологические параметры процесса ЭЛС имели следующее значение:

скорость сварки, см/с	3
ток пучка, мА	70
ускоряющее напряжение, кВ	20
ток фокусировки, мА	130
диаметр пучка, см	0,015

В результате металлографического контроля были получены микрошлифы сварного шва:

- в середине зоны ввода электронного луча ($t_{ycm}^{opt}/2$) (рис. 6);
- в точке завершения ввода электронного луча (t_{ycm}^{opt}) (рис. 7).

Как видно из полученных микрошлифов, в середине зоны ввода луча ширина и глубина сварного шва составляют около 1 мм, что говорит о равномерном распределении энергии. В точке завершения ввода ширина и глубина шва чуть больше 1 мм, а форма близка к «кинжальной», что говорит об адекватности разработанного критерия оптимизации, и о возможности дальнейшего применения полученных результатах.

Заключение

Разработанная АСУ процессом ввода электронного луча учитывает габариты изделия (толщину и длину), а также тип материала. Предусмотренная возможность выбрать сплав свариваемого изделия и технологические параметры.

Применяемая в системе математическая модель оптимизации режима ввода электронного пучка учи-

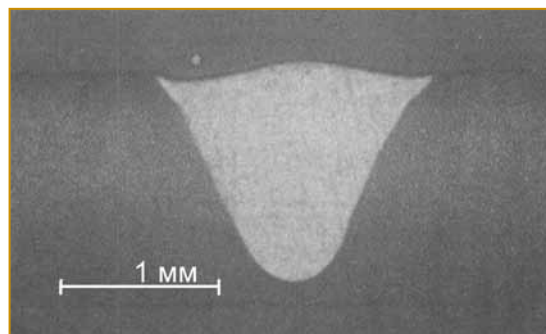


Рис. 9. Микрошлиф сварного шва в точке завершения ввода электронного луча

„Когда ум рассматривает предмет лишь в общих чертах, то в них видно только смещение непостижимых затруднений и неясностей... Внесите туда лучи размышления, и все, что было неясным, станет ясным.

Клод Адриан Гельвеций

тывает характер распределения тепла в зоне проплавления, установленные технологические параметры процесса ЭЛС, геометрию изделия, а также требуемые параметры сварного соединения тонкостенных конструкций. Использование такой модели позволило создать математическое обоснование выбора технологических параметров для разных режимов ввода луча.

Для подтверждения работоспособности предлагаемого решения проведены натурные эксперименты на образцах тонкостенных конструкций. Полученный сварной шов в районе точки ввода луча позволяет говорить о том, что предлагаемая система обеспечивает формирование качественного сварного соединения, что подтверждается представленными микрошлифами.

Список литературы

1. Младенов Г. и др. Моделирование и оптимизация электронно-лучевой сварки сталей // Вестник Пермского

национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – N. 4. С.7-21.

2. Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Цаплин А.И. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного пучка // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – N. 6-2. С.124-133.
3. Raj R.A., Anand M.D. Modeling and prediction of mechanical strength in electron beam welded dissimilar metal joints of stainless steel 304 and copper using grey relation analysis // Int. J. Eng. Technol. – 2018. – Vol. 7, No. 1. P.198-201.
4. Kanigalpula P.K.C. et al. Experimental investigations, input-output modeling, and optimization of spiking phenomenon in electron beam welding of ETP copper plates // Measurement. – 2018. – Vol. 129, No.1. P.302-318.
5. Peter S.E. et al. Wavelet based spike propagation neural network (WSPNN) for wind power forecasting // Int Rev Model Simul (IREMOS). – 2013. – Vol. 6, No. 5. P.1513-1522.
6. Farahat M.A. et al. Short term load forecasting using BP neural network optimized by particle swarm optimization // Int. Rev. Model. Simulations. – 2013. – Vol. 6, No. 2.
7. Ananthamoorthy N., Baskaran K. Modelling, simulation and analysis of fuzzy logic controllers for permanent magnet synchronous motor drive // International Review on Modelling and Simulations. – 2013. – Vol. 6, No. 1. P.75-82.
8. Cho W.I. et al. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212, No. 1. P.262-275.

*Курашкин Сергей Олегович – аспирант, Тынченко Вадим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Рогова Дарья Васильевна – студентка бакалавриата кафедры информационно-управляющих систем СибГУ им. М.Ф. Решетнева.
E-mail: scorpion_ser@mail.ru*

СИБУР оптимизирует систему объемно-календарного планирования с помощью отечественной платформы 3V

Вышедшая в 2019 г. отечественная платформа 3V (ТриВи), разработчиком которой является АО «Тривим», показала первые серьезные результаты. Она была успешно внедрена и уже функционирует на предприятиях нефтехимической группы СИБУР. Платформа 3V позволяет быстро и эффективно решать задачи цифровизации бизнес-процессов внутри компании, обработки и анализа больших данных. Платформа поддерживает современные мировые тренды: внедрение гибких методологий создания информационных систем, открытое API, Low/No-code парадигму.

Внедрение платформы 3V обеспечило централизованный сбор и обработку данных с производственных предприятий для формирования валидных производственных ограничений для системы объемно-календарного планирования в рамках проекта по оптимизации управления цепями поставок «УЦП 3.0». Необходимость собирать показатели с каждого предприятия, отслеживать каждый продукт, иметь оцифрованные ограничения по марочным переходам (набор возможных последовательностей

производства марок с отражением всех сопровождающих данный переход факторов: снижение производительности, технологические простои, наработка нецелевых марок и т.д.) – все эти задачи стали предпосылками для старта проекта.

До внедрения проекта сбор данных осуществлялся вручную через Excel-формы, при этом допускалось большое число ошибок, файлы отправлялись на доработку, зачастую необходимо было произвести несколько циклов проверки корректности собранных данных. После внедрения решения 3V на предприятии создана единая система, которая отвечает за сбор различных характеристик работы установок, позволяет в режиме одного окна всем участникам отслеживать текущее состояние характеристик, проверять корректность данных и их статус. Любой участник процесса может посмотреть данные, которые он согласовал, и при необходимости сопроводить комментарием.

В будущем планируется развитие функциональности внедренной системы, а также использование платформы 3V в рамках других проектов СИБУРа.

<http://www.sibur.ru>