

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.07

УДК 621.791.722

А.В. Мурыгин, В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, А.Н. БочаровСибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия**ПРОТОТИП СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОЦЕССА ЭЛС**

Чтобы получать качественные соединения при электронно-лучевой сварке (ЭЛС), необходимо проводить данный процесс при оптимальных параметрах ЭЛС. Актуальность данной задачи в том, что основным методом обработки режимов сварки и выбора оптимальных параметров ЭЛС является сварка образцов изделия. Применение прототипа системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС позволит получить готовые решения для сварки изделия и минимизировать затраты на обработку технологического решения для процесса ЭЛС. **Цель исследования:** сокращение времени подбора оптимальных технологических параметров процесса электронно-лучевой сварки изделий и повышение качества сварных соединений. **Результаты:** разработанный прототип системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС состоит из трех программных частей: ПО технолога, ПО моделирования ЭЛС и базы данных. В качестве средств реализации программы были выбраны системы управления базами данных MySQL и программирования Embarcadero RAD Studio. Связующим звеном программных компонентов прототипа выступает база данных, позволяющая хранить и обрабатывать результаты математического и имитационного моделирования, набор готовых технологических решений, а также информацию о свариваемых деталях, параметрах техпроцесса и результатах сварки. **Практическая значимость:** данный прототип предоставляет пользователю возможность не только протоколировать технологический процесс сварки, но и выбирать готовые технологические решения, осуществлять моделирование процесса ЭЛС по заданным технологическим параметрам и находить технологические параметры для новых деталей. Применение предложенного прототипа позволяет минимизировать затраты предприятия на обработку технологического процесса ЭЛС, а также создать информационную базу по проведенным сваркам изделий и готовым технологическим решениям процесса ЭЛС.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронный луч, моделирование процесса, технологические параметры сварки, прототип.

A.V. Murygin, V.S. Tynchenko, S.O. Kurashkin, A.N. Bocharov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

PROTOTYPE OF THE TECHNOLOGICAL DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE EBW PROCESS

In order to obtain high-quality compounds during electron beam welding (EBW), it is necessary to carry out this process at optimal EBW parameters. The relevance of this task is that the main method of working out welding modes and choosing optimal parameters of the EBW is welding of product samples. The use of a prototype of a technological decision support system for the EBW process will allow you to get ready-made solutions for welding the product and minimize the cost of developing a technological solution for the EBW process. **The purpose of the study:** to reduce the time of selection of optimal technological parameters of the process of electron beam welding of products and improve the quality of welded joints. **Results:** The developed prototype of the technological decision support system for the EBW process consists of three program parts: By technologist, by EBW modeling and database. MySQL database management and Embarcadero RAD Studio programming systems were chosen as the means of implementing the program. The connecting link of the software components of the prototype is a database that allows you to store and process the results of mathematical and simulation modeling, a set of ready-made technological solutions, as well as information about the parts being welded, process parameters and welding results. **Practical relevance:** This prototype provides the user with the opportunity not only to log the welding process, but also to choose ready-made technological solutions, to simulate the EBW process according to specified technological parameters and to find technological parameters for new parts. The use of the proposed prototype makes it possible to minimize the costs of the enterprise for the development of the EBW technological process, as well as to create an information base on the welding of products and ready-made technological solutions of the EBW process.

Keywords: electron-beam welding, electron beam, modeling of process, technological parameters of welding, prototype.

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является одним из перспективных и высокотехнологичных способов сварки различных металлов и сплавов, в первую очередь тугоплавких, химически активных и разнородных качественных сталей, высокопрочных сплавов на основе алюминия и титана. Наиболее широко данный вид сварки применяется в автомобильной, авиационной и космической отраслях, судостроении и ядерной энергетике, где к качеству сварных соединений предъявляются наиболее высокие требования [1–3].

Электронно-лучевая сварка обладает широкими технологическими возможностями, такими как реализация импульсного режима работы, перемещение электронного луча по поверхности свариваемого изделия с помощью быстродействующей отклоняющей системы по любому сложному контуру, динамическая фокусировка, многолучевая

сварка. Причем технологические возможности ЭЛС значительно расширяются по мере автоматизации процесса и совершенствования средств управления процессом ЭЛС [2, 4, 5].

Чтобы получить качественный шов, необходимо поддерживать на требуемом уровне определенный набор технологических и энергетических параметров [6, 7]. Нарушение оптимальных режимов ЭЛС приводит к различным дефектам сварочного шва, причем даже на хорошо свариваемых материалах. Ряд дефектов, известных как дефекты формирования, встречаются при любой сварке плавлением. Это непровары, подрезы, провисание шва. Кроме этого возникают специфические дефекты ЭЛС: корневые дефекты, протяженные полости в объеме шва, «срединные» трещины и отклонение шва от стыка [8–10].

Для повышения качества технологического процесса электронно-лучевой сварки многие исследователи проводят математическое моделирование данного процесса с заданием различных режимов процесса и материалов [7, 19]. В работах [11–14] на основании экспериментальных данных и результатов моделирования геометрии сварных швов изделий из нержавеющей стали при различных параметрах режима ЭЛС проводились многокритериальный анализ и оптимизация процесса ЭЛС. В работе [15, 16] описана математическая модель процессов испарения, конденсации, а также диффузии сплава АМгб при электронно-лучевой сварке. А в работе [17] исследуется зависимость режимов электронно-лучевой сварки от свойств материала. В работе [19] разработана методика, оценивающая эффективность технологического процесса на основе геометрических и теплофизических параметров сварных конструкций.

Но до сих пор одним из основных методов отработки режимов сварки и выбора оптимальных параметров является сварка образцов изделия. Например, в работе [18] разрабатывалась методика перехода от аргонодуговой сварки к ЭЛС. Подбор режимов электронно-лучевой сварки осуществлялся на образцах, имитирующих сварное соединение. В работах [20, 21] образцы используются для исследования процесса ЭЛС и повышения качества сварки посредством устранения дефектов шва.

1. Математическое обеспечение программной системы

Определение оптимальных режимов электронно-лучевой сварки основывается на математической модели температурного поля изделия при электронно-лучевой сварке. Данная математическая модель пред-

ставляет собой суперпозицию двух источников теплоты постоянной мощности, которые движутся прямолинейно с постоянной скоростью. В качестве одного источника взят мгновенный точечный источник на поверхности полубесконечного тела [22, 23]:

$$T_1(x, y, z, q, v, t) = T_n + \frac{2q}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} e^{-\frac{v\tau}{2a}} \int_0^t e^{\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{x^2+y^2+z^2}{4a\tau}} \frac{d\tau}{\tau^{3/2}}, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты рассматриваемой точки в пространстве; q – эффективная мощность электронного луча; v – скорость сварки; t – время, отсчитываемое от момента прохождения источника через сечение, в котором находится рассматриваемая точка; T_n – начальная температура изделия; $c\rho$ – теплоемкость материала; a – коэффициент температуропроводности; τ – длительность распространения теплоты в подвижной системе координат, $\tau = t - t'$; t – текущий момент времени; t' – некоторый момент времени после начала нагрева.

В качестве второго источника взят линейный источник теплоты [22, 23]:

$$T_2(x, y, z, q, v, t) = T_n + \frac{q}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^t e^{\frac{v^2\tau}{4a} - \frac{2\lambda\tau}{c\rho\delta} - \frac{x^2+y^2}{4a\tau}} \frac{d\tau}{\tau}, \quad (2)$$

где δ – толщина изделия; λ – коэффициент теплопроводности; t – время распространения теплоты.

Мощность источников определяется по следующей формуле:

$$q = I \cdot U \cdot \eta \cdot 0,24, \quad (3)$$

где U – ускоряющее напряжение; I – ток пучка; η – КПД.

Алгоритм поиска оптимальных параметров сварки представлен на рис. 1. Поиск технологических параметров электронно-лучевой сварки начинается с инициализации данных. Определяются мощность источников, свойства материалов, скорость сварки и время сварки. Большинство данных берется из базы данных, где хранятся параметры материалов и технологического процесса ЭЛС. По формулам (1) и (2) производится расчет температурного поля изделия. Данный процесс итерационный, так как в процессе расчетов уточняются время сварки и скорость сварки.

Функционал Ω служит для определения оптимальности полученных параметров. Минимальное значение Ω служит маркером того, что выбранные параметры сварочного процесса являются оптимальными. Поэтому для выбранного изделия (материал, толщина изделия) вычисления могут проводиться множество раз, при различных параметрах процесса сварки (мощность, скорость сварки).

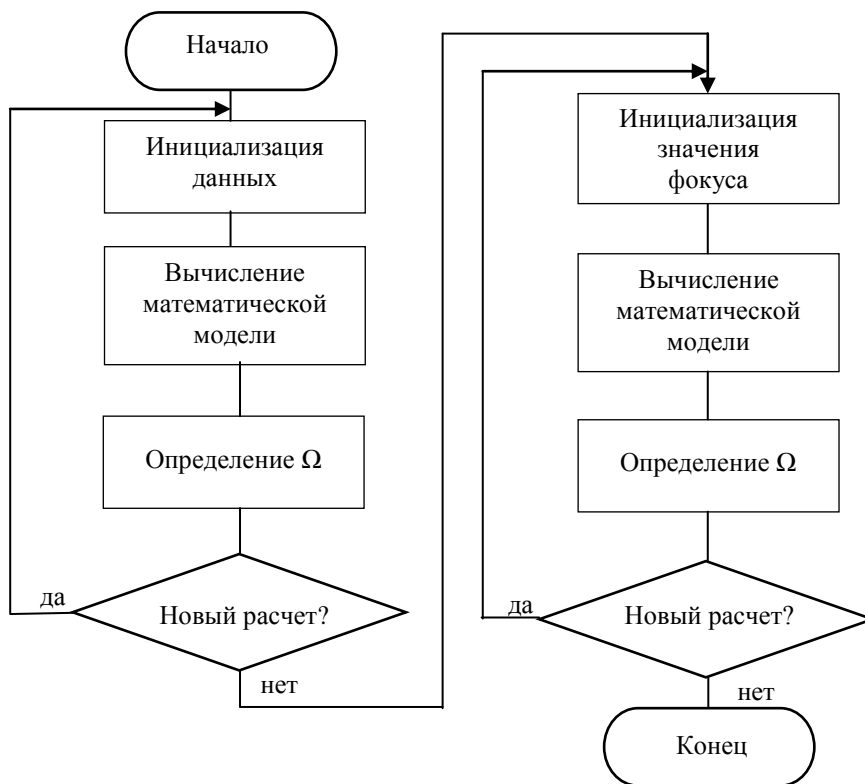


Рис. 1. Алгоритм определения оптимальных параметров сварки

Вторая часть алгоритма служит для определения оптимального фокуса электронно-лучевой сварки. В данном случае математическая модель вычисляется повторно для различного положения фокуса (от расположенного над поверхностью детали до корня шва). Также по функционалу Ω определяется оптимальное значение фокуса.

2. Проектирование программного обеспечения

Прототип системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС разработан на языке C++ и представляет собой программное обеспечение, состоящее из трех основных программных компонентов:

- 1) программного обеспечения (ПО) технолога;
- 2) ПО моделирования процесса ЭЛС;
- 3) базы данных.

ПО технолога и ПО моделирования процесса ЭЛС представляют собой Windows-приложения, работа которых возможна в среде опера-

ционных систем Windows 7/8/10. Данные компоненты могут функционировать отдельно друг от друга и запускаться в зависимости от задач, стоящих перед технологами и учеными. Структурная схема прототипа системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС показана на рис. 2.

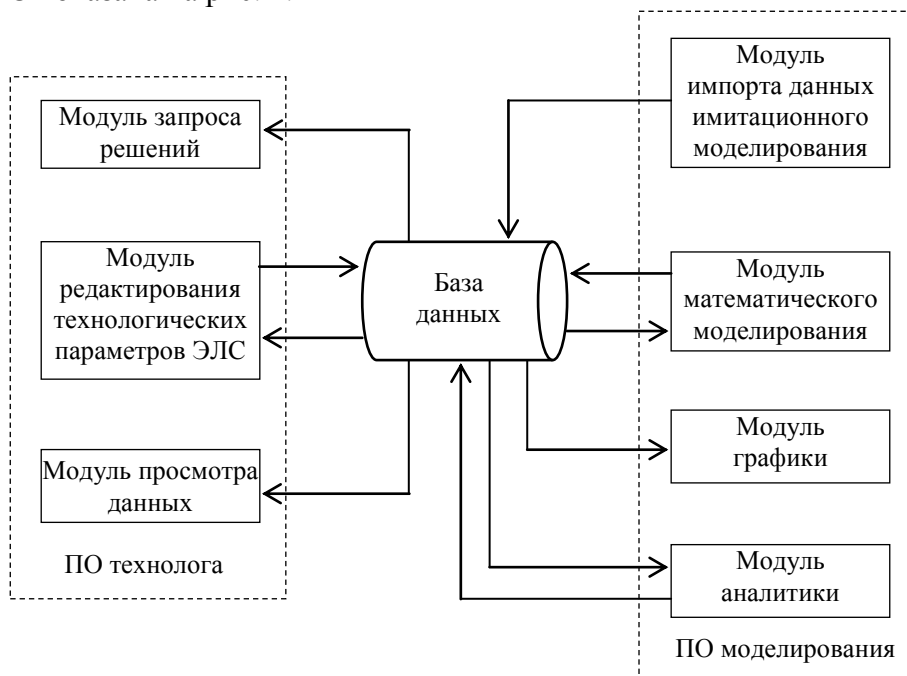


Рис. 2. Структурная схема прототипа системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС

ПО технолога состоит из трех модулей:

- 1) модуль редактирования технологических параметров ЭЛС осуществляет ввод и редактирование параметров процесса ЭЛС;
- 2) модуль запроса решений осуществляет выборку из базы данных технологических решений для проведения процесса ЭЛС и достижения требуемых параметров шва;
- 3) модуль просмотра данных осуществляет вывод графиков значений параметров проведенных сварочных процессов, содержащихся в базе данных.

ПО моделирования состоит из четырех модулей, обеспечивающих следующие функции:

- 1) модуль математического моделирования реализует процесс электронно лучевой сварки;

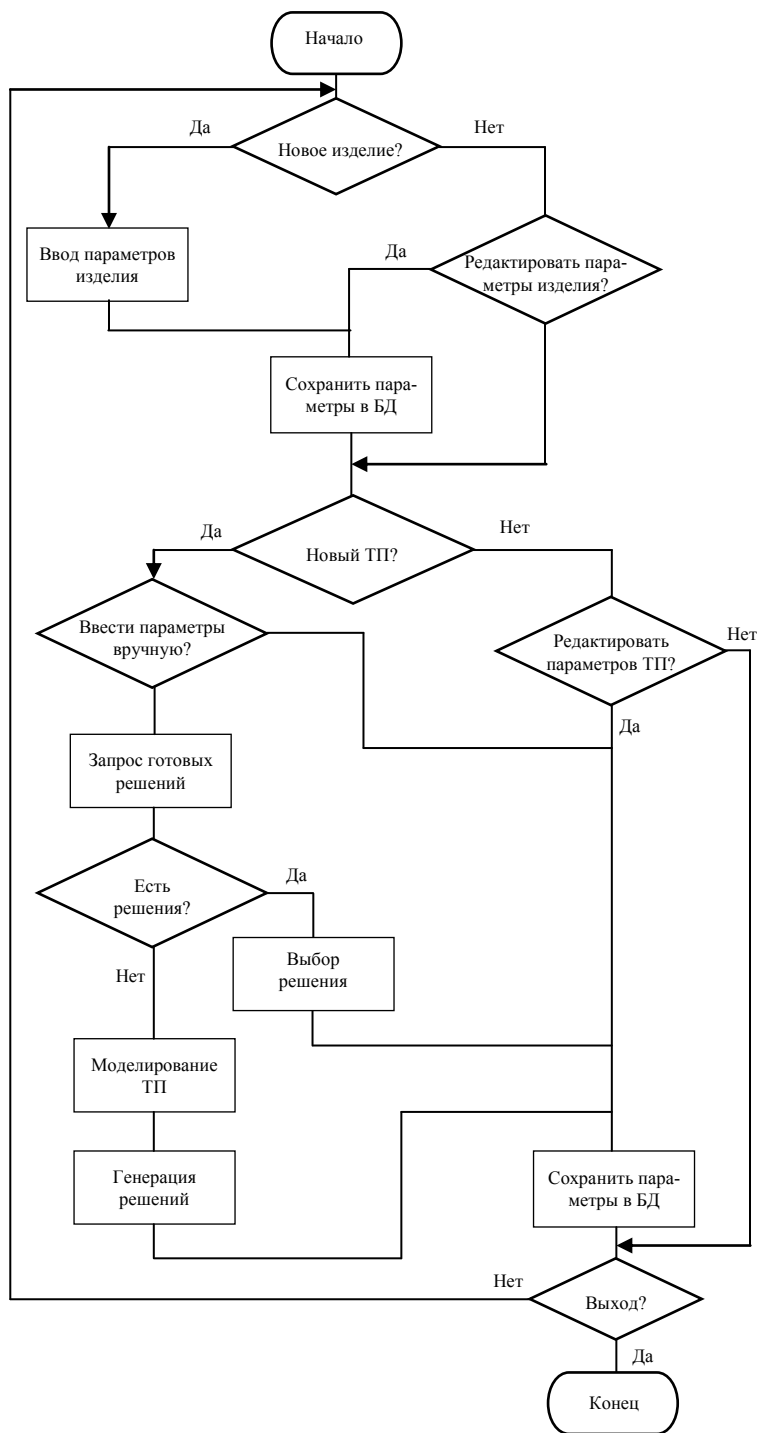


Рис. 3. Блок-схема работы прототипа системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС

2) модуль импорта данных имитационного моделирования осуществляет ввод данных и графиков моделирования, осуществленных в сторонних программных продуктах имитационного моделирования;

3) модуль графики осуществляет графическое построение результатов математического моделирования процесса ЭЛС;

4) модуль аналитики обрабатывает данные математического моделирования и осуществляет выработку технологических решений для процесса электронно-лучевой сварки.

Блок-схема работы прототипа системы поддержки принятия технологических решений показана на рис. 3.

Работа начинается с ПО технолога. Технолог вводит или редактирует данные свариваемого изделия, а затем переходит к вводу параметров технологического процесса: ток электронного луча, ускоряющее напряжение, ток фокуса, скорость сварки. Параметры можно вводить вручную или использовать уже готовые техпроцессы, используемые ранее. Прототип системы также позволяет просмотреть рекомендуемые решения и выбрать подходящие для сварки изделия параметры. Если их нет, производится моделирование технологического процесса, и на основании полученных результатов моделирования осуществляется выработка технологических решений для процесса ЭЛС. За последних два шага отвечает ПО моделирования процесса ЭЛС.

3. Информационное обеспечение программной системы

Одним из основных компонентов системы поддержки принятия решений для процесса ЭЛС и связующим элементом программных компонентов данной системы является база данных, которая содержит данные по технологическому процессу ЭЛС, результаты моделирования, параметры модели, а также полученные рекомендации для процесса ЭЛС. В качестве СУБД используется MySQL [24, 25]. Структурная схема базы данных показана на рис. 4–5.

База данных прототипа системы поддержки принятия решений для процесса ЭЛС состоит из двух частей. Таблицы product, techprocess, datawelding и samples (см. рис. 3) обеспечивают работу ПО технолога и предназначены для хранения информации о свариваемых изделиях и заданных параметров технологического процесса. Кроме этого в базу данных (таблица datawelding) сохраняются значения параметров сварки (ток электронного луча, ускоряющее напряжение, ток фокуса, ток накала, скорость сварки, давление в вакуумной камере) в течение процесса

ЭЛС. Также в базе данных (таблица samples) хранятся ссылки на файлы с результатами контроля качества свариваемых изделий в виде фотографий шлифов и экспертных заключений.

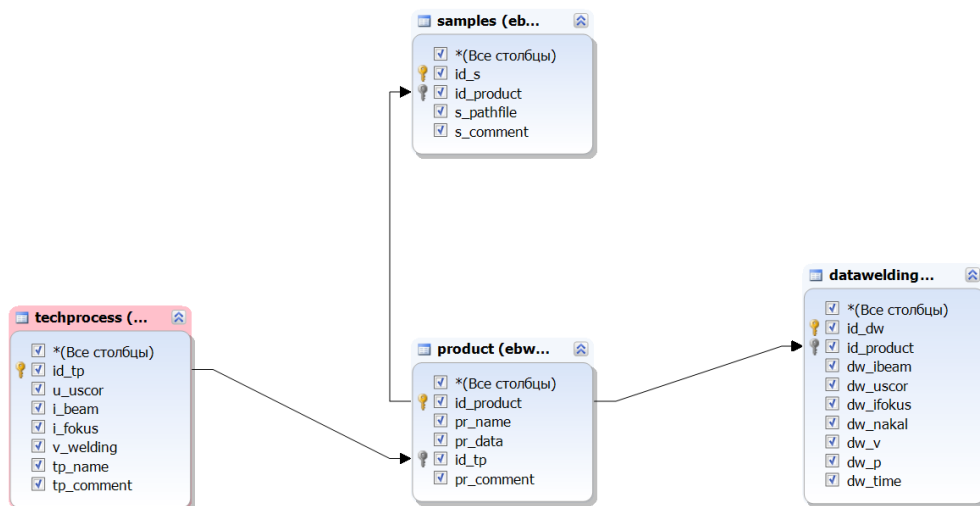


Рис. 4. Структурная схема базы данных прототипа поддержки принятия решений для процесса ЭЛС. Технологическая часть

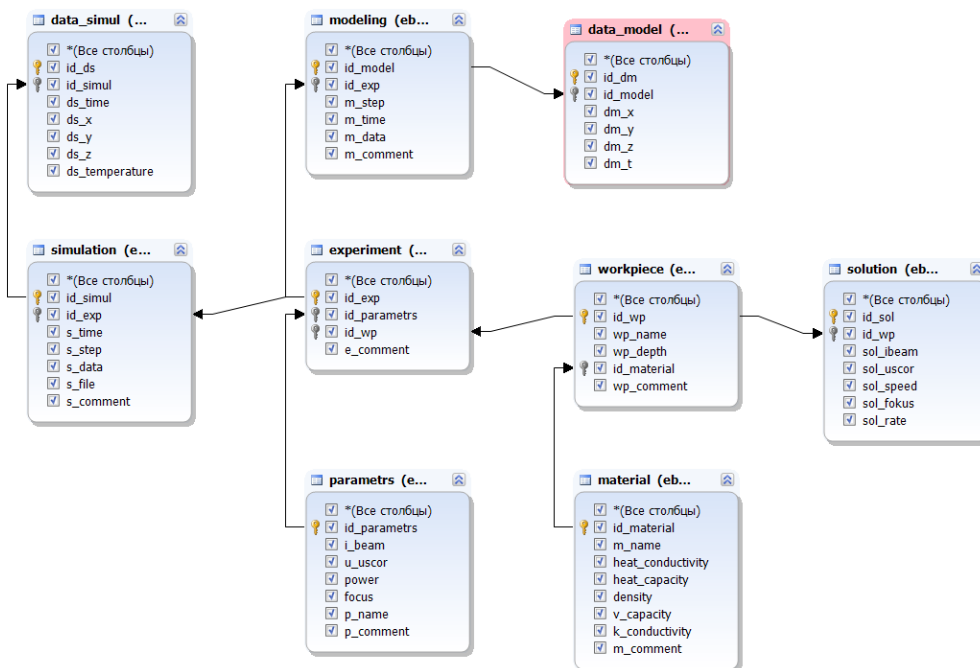


Рис. 5. Структурная схема базы данных прототипа поддержки принятия решений для процесса ЭЛС. Моделирование

Вторая часть базы данных (см. рис. 4) предназначена для работы ПО моделирования процесса ЭЛС и хранит параметры и результаты моделирования, а также предлагаемые решения для процесса ЭЛС. Центральной таблицей для данного фрагмента базы данных является таблица *workpiece*, которая содержит геометрические параметры заготовки. В таблице *material* содержатся данные о свойствах материала заготовки, а в таблице *solution* – готовые технологические решения. Данные решения получают после анализа результатов моделирования, которые содержатся в остальных таблицах. Таблицы *experiment* и *parametr*s содержат исходные данные для математического моделирования процесса ЭЛС. Таблицы *modeling* и *data_modeling* предназначены для хранения результатов математического моделирования процесса ЭЛС. А таблицы *simulation* и *data_simulation* хранят результаты имитационного моделирования, проведенного в сторонних программных продуктах.

4. Описание работы программной системы

На рис. 6 показана основная форма ПО технолога.

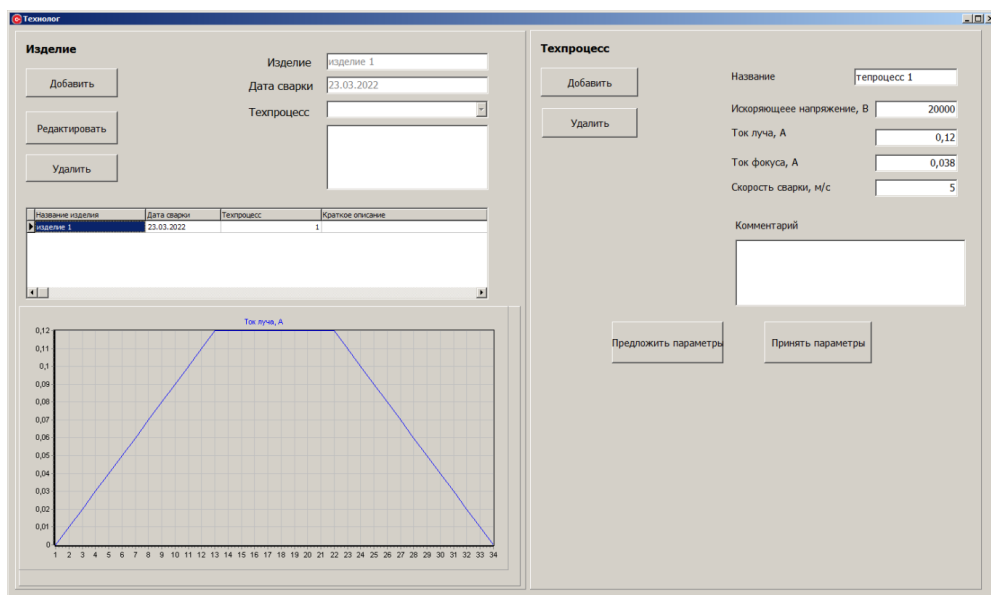


Рис. 6. Основная форма ПО технолога

Форма разделена на две части. В левой части формы представлены данные по свариваемому изделию. С помощью кнопок можно добавить новое изделие, отредактировать данные по уже введенному изделию или удалить изделие из базы данных. Кроме этого можно просмотреть

реть графики технологических параметров проведенной сварки. В правой части располагаются данные по параметрам технологического процесса, а также можно добавить в базу данных новый технологический процесс и его параметры. Это можно сделать вручную или выбрать предложенное решение. Список готовых решений формируется динамически с помощью кнопки «Предложить параметры». На рис. 7 представлена основная форма ПО моделирования процесса ЭЛС.

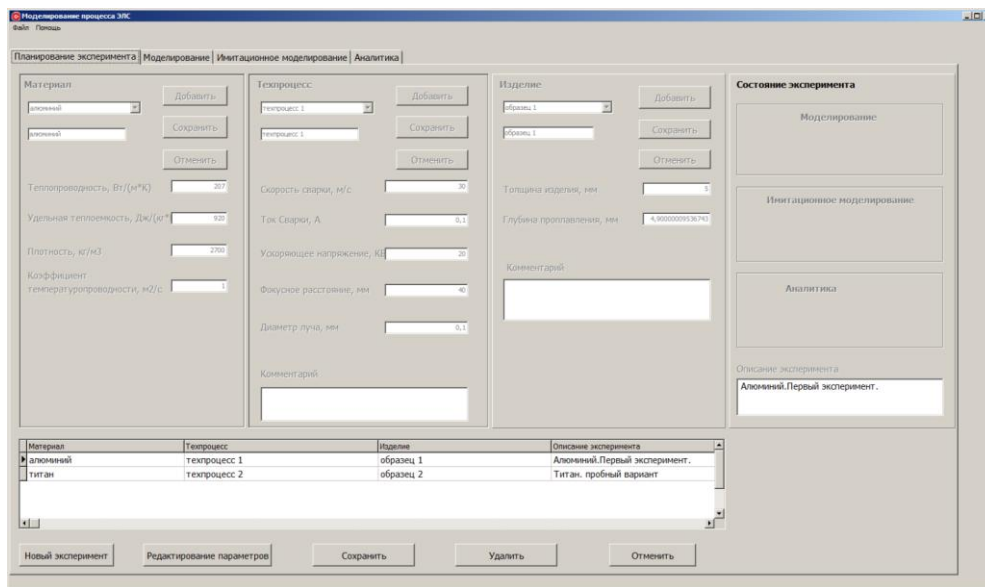


Рис.7. Основная форма ПО моделирования процесса ЭЛС

ПО моделирования процесса ЭЛС построена на базе программной системы математического моделирования процесса ЭЛС [23]. Основная форма состоит из четырех вкладок: планирование эксперимента, моделирование, имитационное моделирование, аналитика. Работа ПО моделирования процесса ЭЛС начинается со вкладки «Планирование эксперимента». Данная вкладка позволяет управлять экспериментами (создавать новые, редактировать старые) и параметрами экспериментов. Вкладка разбита на три сегмента: материалы, техпроцесс, изделия. В данные сегменты вводятся параметры материалов и технологические параметры процесса ЭЛС, которые будут использоваться при моделировании процесса ЭЛС. Остальные вкладки отвечают за моделирование процесса ЭЛС (Моделирование), ввод и отображение результатов моделирования в сторонних программных продуктах (Имитационное моделирование) и формирование готовых технологических решений (Аналитика).

Заключение

В данной работе предложен прототип системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС. Прототип состоит из трех компонентов. Связующим звеном системы выступает база данных, позволяющая хранить и обрабатывать информацию по результатам математического моделирования, имитационного моделирования и набор готовых технологических решений.

Математическое обеспечение поиска решений позволяет проводить несколько циклов математического моделирования процесса ЭЛС, создавая набор решений для соответствующих деталей и выделяя из них оптимальное решение. Применение предложенной программной системы позволяет не только минимизировать затраты предприятия на отработку технологических параметров процесса электронно-лучевой сварки, а также создать информационную базу по проведенным сваркам изделий и готовым технологическим решениям процесса ЭЛС.

Дальнейшая разработка системы поддержки принятия решений предполагает введение интеллектуальных алгоритмов обработки данных моделирования процесса и данных сварки для более точного подбора технологических параметров ЭЛС.

Библиографический список

1. Саломатова Е.С. Электронно-лучевая сварка – от изобретения до наших дней // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – № 1. – С. 74–87.

2. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки / В.В. Башенко, В. Б. Вихман, А.Н. Козлов, И.С. Гайдукова // Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки 2008: материалы Первой Санкт-Петербург. междунар. науч.-техн. конф. – СПб: Агентство «Вит-Принт», 2008. – С. 5–21.

3. Zhiqiang Li, Chen Wei. Application progress of power beam processing technology in aeronautical industry // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. – 2022. – 43(4): 526882 (in Chinese). DOI: 10.7527/S1000-6893. 2022. 26882

4. Управление электронно-лучевой сваркой / В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.Я. Браверман; под ред. В.Д. Лаптенка. – Красноярск: САА, 2000. – 234 с.

5. Валь Маттиас. Обработка элементов силовых передач электронным лучом с малой деформацией и эффектом нескольких процессов // Технологии и оборудование ЭЛС – 2011: материалы Санкт-Петербург. междунар. науч.-техн. конф. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 15–26.

6. Sandhya V., Naga Phani Sastry M., Nema Chandra Reddy K. Influence of welding speed, voltage, and beam current on the microstructure and mechanical properties of electron beam-welded titanium radial joints, materials today: Proceedings. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.808>

7. Simulation model of the electron beam welding process for the formation of the effective technological parameters during the welding of aerospace structures / S. Kurashkin, V. Bukhtoyarov, A. Myrugin, A. Bocharov, Y. Seregin, D. Rogova // 2022 21st International Symposium INFOTEN-JAHORINA (INFOTEN). – IEEE, 2022. – P. 1–5.

8. Путилова А.О., Голубев В.В. Предотвращение специфических дефектов ЭЛС при сварке изделий больших толщин [Электронный ресурс] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., посв. Дню космонавт. / Сиб. ГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2019. – С. 553–555. – URL: <https://apak.sibsau.ru/page/materials>

9. Электронно-лучевая сварка: монография / Г.М. Младенов, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Е.Г. Колева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 374 с.

10. Григорьев В.В., Муравьев В.И., Бахматов П.В. Исследование возникновения специфических дефектов электронно-лучевой сварки (ЭЛС) титановых сплавов // Сварочное производство. – 2019. – С. 36–42.

11. Modeling and optimization of electron beam welding of steels / G. Mladenov, E. Koleva, V.Ya. Belenky, D.N. Trushnikov // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. – 2014. – Vol. 16, № 4. – P. 7–21.

12. Experimental investigations, inputoutput modeling, and optimization of spiking phenomenon in electron beam welding of ETP copper plates / P.K.C. Kanigalpula, S. Jaypuria, D.K. Pratihari, M.N. Jha // Measurement. – 2018. – Vol. 129, № 1. – P. 302–318.

13. Optimization possibility of beam scanning for electron beam welding: Physics understanding and parameters selection criteria / M. Luo, R. Hu, T. Liu, B. Wu, S. Pang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 127, № 1. – P. 1313–1326.

14. Multicriterial optimization strategies for electron beam welding processes / E. Koleva, L. Koleva, Dm. Trushnikov, G. Kolev, Z. Petrova // Journal of Physics: Conference Series 2240. – 2022. – 012038 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2240/1/012038>.

DOI:10.1088/1742-6596/2240/1/012038

15. Применение параллельных вычислений для исследования испарения при электронно-лучевой сварке / Е.С. Саламатова, Д.Н. Трушников, А.И. Цаплин, В.Я. Беленький // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 39. – С. 96–108.

16. Саламатова Е.С., Трушников Д.Н., Цаплин А.И. Моделирование процессов испарения при электронно-лучевой сварке с динамическим позиционированием электронного пучка // Известия Тульск. гос. ун-та. Технические науки. – 2015. – № 6–2. – С. 124–133.

17. Влияние теплофизических свойств материалов на выбор режима ЭЛС / В.С. Грибков, В.Н. Мартынов, А.С. Кожеченко, А.В. Щербаков // Электротехнология. – 2015. – № 9. – С. 30–35.

18. Захаров А.С., Беленький В.Я. Перевод процесса изготовления изделия с автоматической аргодуговой сварки на электронно-лучевую. Подбор режима ЭЛС // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молод. ученых, аспирантов и студентов. / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2022. – С. 401–404.

19. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding / S. Kurashkin [et al.] // Procedia Computer Science. – 2022. – Т. 200. – Р. 83–90.

20. Электронно-лучевая сварка колес зубчатых из теплоустойчивой стали ЭИ – 415 / А.В. Свиридов, А.С. Воробьев, В.Н. Батраков, А.Л. Каменева // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: материалы IV Междунар. конф. / Науч.-исслед. ун-т «МЭИ». – М., 2021. – С. 192–208.

21. Исаев С.Л. Повышение качества сварного шва тонкостенных паяных оболочек из коррозионностойкой стали // Современные материалы, техника и технологии: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Университетская книга, 2015. – С. 61–64.

22. Коновалов А.В. Теория сварочных процессов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. – 52 с.

23. Программная система математического моделирования процесса электронно-лучевой сварки / А.В. Мурыгин, В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, А.Н. Бочаров, В.Е. Петренко // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2021. – № 2. – Т. 22. – С. 261–274.

24. MySQL [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mysql.com/> (дата обращения: 01.05.2021).

25. MySQL для больших данных / Ш. Чаллавала, Дж. Лакхатария, Ч. Мехта, К. Патель. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 226 с.

References

1. Salomatova E.S. Elektronno-luchevaia svarka - ot izobreteniia do nashikh dnei [Electron beam welding - from the invention to the present day]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2013, no. 1, pp. 74-87.

2. Bashenko V.V., Vikhman V.B., Kozlov A.N., Gaidukova I.S. Sostoianie i perspektivy razvitiia elektronno-luchevoi svarki [The state and prospects of development of electron beam welding]. *Tekhnologii i oborudovanie elektronno-luchevoi svarki 2008. Materialy Pervoi Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii*. Saint Petersburg: Agentstvo “Vit-Print”, 2008, pp. 5-21.

3. Zhiqiang Li, Chen Wei. Application progress of power beam processing technology in aeronautical industry. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 526882 (in Chinese). DOI: 10.7527/S1000-6893.2022.26882

4. Laptенок V.D., Murygin A.V., Seregin Iu.N., Braverman V.Ia. Upravlenie elektronno-luchevoi svarkoi [Control of electron beam welding]. Ed. V.D. Laptenska. Krasnoyarsk: SAA, 2000, 234 p.

5. Val' Mattias. Obrabotka elementov silovykh peredach elektronnykh luchom s maloi deformatsiei i efektom neskol'kikh protsessov [Processing of power transmission elements by an electron beam with low deformation and the effect of several processes]. *Tekhnologii i oborudovanie ELS - 2011. Materialy Sankt-Peterburgskoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii*. Saint Petersburg: Politekhnicheskii universitet, 2011, pp. 15-26.

6. Sandhya V., Naga Phani Sastry M., Hema Chandra Reddy K. Influence of welding speed, voltage, and beam current on the microstructure and mechanical properties of electron beam-welded titanium radial joints, materials today: Proceedings, available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.808>

7. Kurashkin S., Bukhtoyarov V., Myrugin A., Bocharov A., Seregin Y., Rogova D. Simulation model of the electron beam welding process for the formation of the effective technological parameters during the welding of aerospace structures. *2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. IEEE, 2022, pp. 1-5.

8. Putilova A.O., Golubev V.V. Predotvrashchenie spetsificheskikh defektov ELS pri svarke izdelii bol'shikh tolshchin [Prevent specific defects in EBW welding of articles of large thickness]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi Dniu kosmonavtiki*. Krasnoarsk: Sibirskii gosudarstvennyi universitet nauki i tekhnologii imeni M.F. Reshetneva, 2019, pp. 553-555, available at: <https://apak.sibsau.ru/page/materials>

9. Mladenov G.M., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Ia., Koleva E.G. Elektronno-luchevaia svarka [Electron beam welding]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, 374 p.

10. Grigor'ev V.V., Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V. Issledovanie vozniknoveniia spetsificheskikh defektov elektronno-luchevoi svarki (ELS) titanovykh splavov [Investigation of the occurrence of specific defects in electron beam welding (EBW) of titanium alloys]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2019, pp. 36-42.

11. Mladenov G., Koleva E., Belenky V.Ya., Trushnikov D.N. Modeling and optimization of electron beam welding of steels. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 7-21.

12. Kanigalpula P.K.C., Jaypuria S., Pratihari D.K., Jha M.N. Experimental investigations, inputoutput modeling, and optimization of spiking phenomenon in electron beam welding of ETP copper plates. *Measurement*, 2018, vol. 129, no. 1, pp. 302-318.

13. Luo M., Hu R., Liu T., Wu B., Pang S. Optimization possibility of beam scanning for electron beam welding: Physics understanding and parameters selection criteria. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 127, no. 1, pp. 1313-1326.

14. Koleva E., Koleva L., Trushnikov Dm., Kolev G., Petrova Z. Multicriterial optimization strategies for electron beam welding processes. *Journal of Physics: Conference Series 2240*, 2022, 012038 p., available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2240/1/012038>.

DOI:10.1088/1742-6596/2240/1/012038

15. Salamatova E.S., Trushnikov D.N., Tsaplin A.I., Belen'kii V.Ia. Primenenie parallel'nykh vychislenii dlia issledovaniia ispareniiia pri elektronno-luchevoi svarke [Application of parallel calculations for the study of evaporation during electron beam welding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika*, 2014, no. 39, pp. 96-108.

16. Salomatova E.S., Trushnikov D.N., Tsaplin A.I. Modelirovanie protsessov ispareniiia pri elektronno-luchevoi svarke s dinamicheskim pozitsionirovaniiem elektronnogo puchka [Simulation of evaporation processes in electron beam welding with dynamic positioning of the electron beam]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 6-2, pp. 124-133.

17. Gribkov V.S., Martynov V.N., Kozhechenko A.S., Shcherbakov A.V. Vliianie teplofizicheskikh svoistv materialov na vybor rezhima ELS [Influence of thermophysical properties of materials on the choice of the EBW mode]. *Elektrometallurgiiia*, 2015, no. 9, pp. 30-35.

18. Zakharov A.S., Belen'kii V.Ia. Perevod protsessa izgotovleniia izdeliia s avtomaticheskoi argonodugovoi svarki na elektronno-luchevuiu. Podbor rezhima ELS [Transfer of the product manufacturing process from automatic argon arc welding to electron beam welding. Selection of the EBW mode]. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2022, pp. 401-404.

19. Kurashkin S. et al. Mathematical modelling of waveguide paths by electron-beam welding *Procedia Computer Science*, 2022, vol. 200, pp. 83-90.

20. Sviridov A.V., Vorob'ev A.S., Batrakov V.N., Kameneva A.L. Elektronno-luchevaia svarka koles zubchatykh iz teploustoichivoi stali EI - 415 [Electron beam welding of gear wheels made of heat-resistant steel EI - 415]. *Elektronno-luchevaia svarka i smezhnye tekhnologii. Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii*. Moscow: Nauchno-issledovatel'skii universitet "MEI", 2021, pp. 192-208.

21. Isaev S.L. Povyslenie kachestva svarnogo shva tonkostennykh paianykh obolochek iz korrozionostoikoii stali [Improving the quality of the weld of thin-walled brazed shells made of corrosion-resistant steel]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. Materialy 5-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kursk: Universitetskaia kniga, 2015, pp. 61-64.

22. Konovalov A.V. Teoriia svarochnykh protsessov [Theory of welding processes]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana. 2007, 52 p.

23. Murygin A.V., Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Bocharov A.N., Petrenko V.E. Programmnaia sistema matematicheskogo modelirovaniia protsessa elektronno-luchevoi svarki [Software system for mathematical modeling of the electron beam welding process]. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal*, 2021, no. 2vol. 22, pp. 261-274.

24. MySQL, available at: <https://www.mysql.com/> (accessed 01 May 2021).

25. Challavala Sh., Lakkhatariia Dzh., Mekhta Ch., Patel' K. MySQL dlia bol'shikh dannykh [MySQL for Big Data]. Moscow: DMK Press, 2018, 226 p.

Сведения об авторах

Мурыгин Александр Владимирович (Красноярск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: avm514@mail.ru).

Тынченко Вадим Сергеевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: vadimond@mail.ru).

Курашкин Сергей Олегович (Красноярск, Россия) – аспирант кафедры «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: scorpio_ser@mail.ru).

Бочаров Алексей Николаевич (Красноярск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационно-управляющие системы» Сибирского государственного университета науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (660037, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: sibalexbo@gmail.com).

About the authors

Aleksandr V. Murygin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Information-Control Systems

Department Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: avm514@mail.ru).

Vadim S. Tynchenko (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Information-Control Systems Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., Krasnoyarsk, e-mail: vadimond@mail.ru).

Sergei O. Kurashkin (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Graduate Student Department of Information-Control Systems Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: scorpion_ser@mail.ru).

Aleksei N. Bocharov (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Information-Control Systems Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (660037, Krasnoyarsk, 31, Krasnoyarsky rabochy ave., e-mail: sibalexbo@gmail.com).

Поступила: 25.05.2022 Одобрена: 10.06.2022 Принята к публикации: 12.09.2022

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края и Краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-48-242917 «Модели и методы управления процессом электронно-лучевой сварки тонкостенных конструкций».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Прототип системы поддержки принятия технологических решений для процесса ЭЛС / А.В. Мурыгин, В.С. Тынченко, С.О. Курашкин, А.Н. Бочаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 132–150. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.07

Please cite this article in English as:

Murygin A.V., Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Bocharov A.N. Prototype of the technological decision support system for the EBW process. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 42, pp. 132-150. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.07