

для автоматизации и повышения продуктивности агропроизводства, снижая при этом расходы и улучшая экологическую устойчивость отрасли.

Данная статья рассматривает ключевые аспекты применения беспилотных авиационных систем в точном земледелии и анализирует преимущества модернизации БАС для автоматизации агротехнических процессов. В результате проводимой модернизации, включающей установку мультиспектральной камеры и замену полетного контроллера, дрон получит возможность выполнять задачи мониторинга и обработки полей в автономном режиме, что способствует снижению затрат на проведение агротехнических мероприятий и повышению их эффективности.

Применение БАС позволяет значительно повысить урожайность и улучшить экологическую безопасность сельского хозяйства. Опыт, накопленный в процессе разработки и испытаний, доказывает, что дроны становятся неотъемлемой частью современного агропроизводства, оказывая положительное воздействие на производственные процессы и укрепляя конкурентоспособность агропредприятий [5].

Список литературы

1. Белов И.И. Современные технологии в сельском хозяйстве / И.И. Белов, М.А. Иванова. – СПб.: Издательство ИТМО, 2022.
2. Петров А.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в агропромышленном комплексе / А.Н. Петров // Агроинновации. – 2021. – № 5. – С. 45–58.
3. Smith J. Drones in Precision Agriculture / J. Smith, R. Johnson – New York: Springer, 2020.
4. Kuhn E.J. Drones in Agriculture: A Review and Future Directions / E.J. Kuhn, J.A. Kaplan, M. Derousseau // Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2014. – Vol. 2, Issue 2. – P. 69–85.
5. Попов В.М. Беспилотные летательные аппараты в сельском хозяйстве / В.М. Попов // Аграрная наука. – 2019. – № 3. – С. 92–103.

УДК 662.761.8.074.7

ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ SOLIDWORKS

Осипенко Анастасия Ивановна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: Osipenkoanastasiya7@gmail.com

ELECTRON BEAM WELDING MODELING CAPABILITIES IN SOLIDWORKS

Osipenko Anastasia Ivanovna

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Аннотация: данная статья посвящена пошаговому описанию методики моделирования сварочного процесса, основанная на представлении движения Гауссова пучка электронов последовательным включением плоских элементов, имитирующих движение сварочного пучка с заданием определенного времени включения каждого из них с использованием модуля FlowSimulation программного продукта SolidWorks и последующая верификации результата с экспериментальными данными.

Abstract: this article is devoted to a step-by-step description of the methodology for modeling the welding process, based on the representation of the movement of a Gaussian beam of electrons by sequential inclusion of flat elements simulating the movement of the welding beam with a specific ignition time for each of them, using the FlowSimulation module of the SolidWorks software product and subsequent verification of the result with experimental data.

Ключевые слова: математическое моделирование; сварочный процесс; объемные сегменты; поверхностные сегменты; мощность тепловыделения; скорость электронного пучка.

Keywords: mathematical modeling; welding process; volumetric segments; heat generation power; electron beam speed.

На сегодняшний день, для исследования распределения тепловых полей в изделии при сварочном процессе широко применяется математическое моделирование. Появляется возможность проводить разработку физико-математических моделей, что ускоряет процесс оптимизации технологических режимов сварки и сокращает издержки на изготовление продукции.

Разработана методика моделирования процесса электронно-лучевой сварки методом контрольных объемов, главным отличием которого является интегрирование исходного дифференциального уравнения по конечному объему, в программном комплексе SolidWorks FlowSimulation. Особенность разработанной методики – это создание сегментов, последовательное включение которых имитирует движение сварочного пучка [1].

Разработанная методика состоит из следующих этапов:

1. Подготовка геометрической модели.

В качестве примера рассмотрим процесс электронно-лучевой сварки образца из алюминиевого сплава 1370 Al-Mg-Si-Cu в виде пластины длиной 35 мм, шириной 26 мм и высотой 1 мм. В зависимости от технологии сварочного процесса и формы сварного шва, создаются поверхностные (при стыковом и торцевом сварном шве) или объемные (наплавление материала при угловых, тавровых, нахлесточных швах) сегменты для задания на них, соответственно, поверхностных или объемных граничных условий мощности тепловыделения [2].

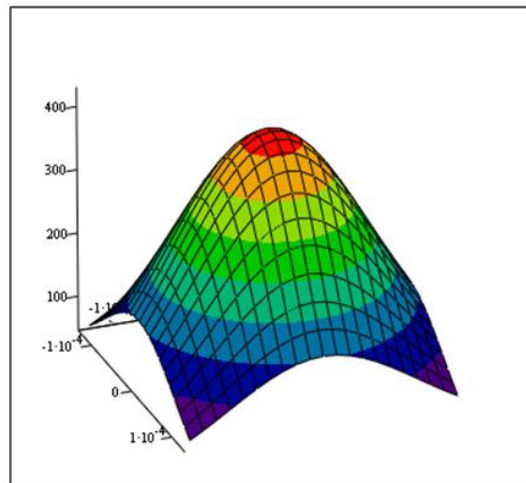
2. Задание граничных условий.

На данном этапе в модели задаются: энергия, радиус и скорость движения электронного пучка. Энергия реального электронного луча сварочной установки неравномерна по сечению и подчиняется Гауссовому распределению [3]:

$$Q_{xy}(x, y) = P \cdot e^{-1 \left(\frac{x^2 + y^2}{r_0^2} \right)},$$

где P – максимальное значение мощности в центре луча, определяется произведением ускоряющего напряжения на ток, Вт; x и y – координаты точек относительно центра луча, м; r_0 – радиус луча, м.

При расчёте мощности, приходящейся на каждый отдельный сегмент, проведено численное интегрирование выражения, приведенного выше для пиковой мощности 420 Вт. Для луча диаметром 0,25 мм распределение энергии по сечению приведено на рисунке 1.



Qxy

Рисунок 1 – Распределение мощности по сечению электронного луча

Особенность разработанной методики – задание времени включения сегментов.

Время включения одного сегмента зависит от скорости движения пучка (V) при известной длине сварного шва (L), вычисляется количество сегментов (N) длиной l в зависимости от диаметра пучка, по формуле: $N=L/l$.

При известном значении скорости движения пучка вычисляется время нагрева (Δt) каждого i -ого сегмента по формуле $\Delta t=L/(V \cdot N)$. Далее определяются дополнительные параметры, описывающие форму кривой мощности нагрева элемента. Длительность фронтов роста и спада влияет на плавность градиента температуры между соседними сегментами.

3. Задание свойств материалов.

Разработанная методика учитывает основные теплофизические свойства используемого материала с учетом фазового перехода в момент его плавления и испарения [4]. Изменение фазового состояния материала на неподвижной расчетной сетке учитывается через величину теплоемкости с помощью выражения:

$$C_p = C_{p-s} + L_f \frac{e^{-((T-T_m)^2/\Delta T^2)}}{\sqrt{\pi}\Delta T^2} + L_v \frac{e^{-((T-T_v)^2/\Delta T^2)}}{\sqrt{\pi}\Delta T^2},$$

где C_{p-s} – удельная теплоемкость материала при температуре 20 °С, Дж/(кг·°С); L_f – удельная теплота плавления материала, Дж/кг; L_v – удельная теплота испарения материала, Дж/кг; $\Delta T = 10$ °С – интервал температуры, в пределах которого происходит фазовый переход; T_m и T_v – температура плавления и испарения материала соответственно, °С.

4. Выбор физических моделей, описывающих процесс теплопередачи, и начальных условий.

Рассматриваемый процесс – нестационарный. Для исследования изменения температуры, задания граничных условий и моделирования процесса воздействия электронным пучком на поверхность образца используются типы задач как «Внутренние», когда есть внешние стенки области моделирования так и «Внешние», когда объект исследования находится в открытом пространстве.

Описанные процессы теплопередачи определяются следующими выражениями: передача энергии излучением [5–7]:

$$Q = \varepsilon C_0 \left(\frac{T^4}{100} - \frac{T_{\text{окр.ср}}^4}{100} \right) S,$$

где ε – степень черноты излучающей поверхности, $C_0 = 5,673$ – коэффициент излучения

абсолютного черного тела, Вт/(м²·К⁴), S – площадь, м².

Уравнение кондуктивной теплопередачи:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = f(x, y, z, t),$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; $f(x, y, z, t)$ – функция источника тепла.

5. Генерация сетки и обработка результатов.

Настраивается «Глобальная» сетка с дополнительным уплотнением в районе сварного шва с помощью инструмента «Локальная» сетка. Глубина проплавления образцов при поверхностном и объемном тепловом источнике со скоростью движения электронного пучка 25 мм/с и пиковым значением энергии 420 Вт, представлена на рисунке 2.

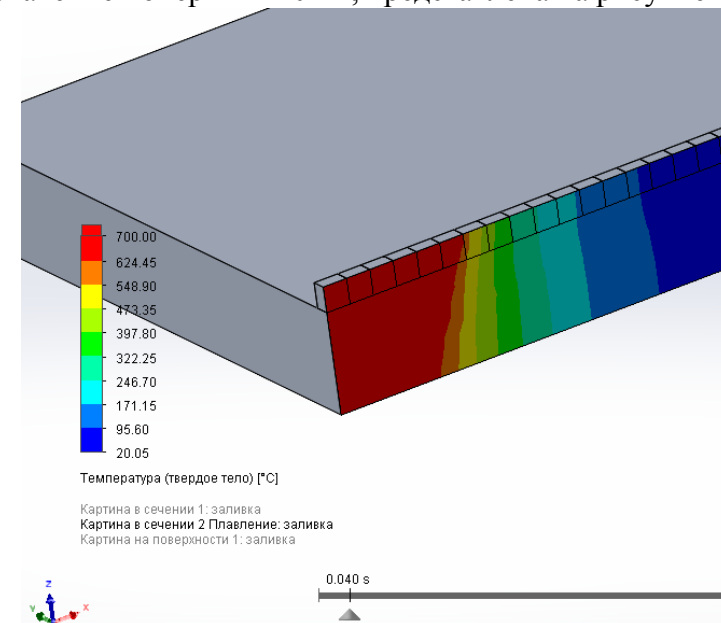


Рисунок 2 – Распределение температурного поля

Для верификации предложенной методики полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными. Сварка проводилась с помощью электронной пушки с плазменным катодом в вакууме со скоростью движения луча 25 мм/с и энергией 420 Вт. На рисунке 3 представлены две пластины, сваренные между собой электронным лучом.

Исходя из расчетов и экспериментальных данных, выявлено, что в режиме электронно-лучевой сварки с мощностью 420 Вт есть риск возникновения прожога так как полученная температура превышает температуру плавления свариваемого материала, а глубина проплавления-толщину свариваемых деталей [8].

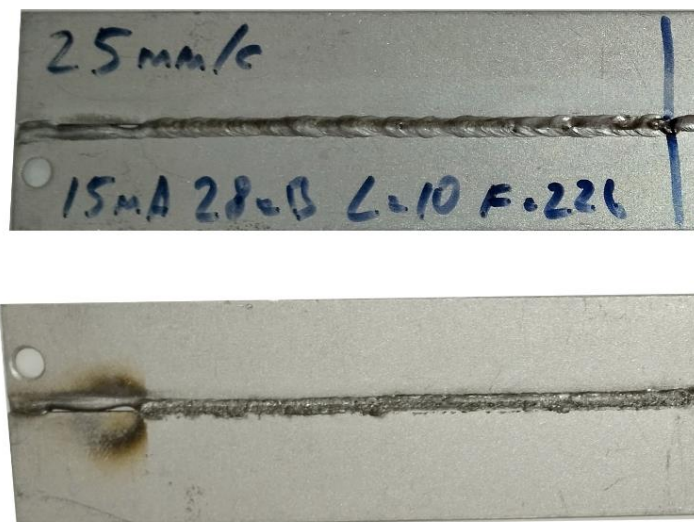


Рисунок 3 – Пластины, сваренные между собой электронным лучом

Разработана методика численного моделирования процесса электронно-лучевой сварки, основанная на представлении движения Гауссова пучка электронов последовательным включением плоских элементов, в программном продукте SolidWorks. Разработанная методика используется для разработки технологических процессов электронно-лучевой сварки тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов. Результаты численного моделирования подтверждены экспериментально, сварной шов, полученный при рекомендованных режимах, не содержит прожогов и обладает требуемой механической прочностью.

Представленная методика может быть адаптирована для других видов свариваемых материалов и типов сварочного процесса.

Список литературы

1. Осипенко А.И., Липовцев А.А. Исследование процесса электронно-лучевой сварки с использованием математического моделирования: сборник трудов, серия «Механика, управление и информатика». – М.: ИКИ РАН, 2021.
2. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
3. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
4. Lapina A.E. Simulation of thermal processes in the treatment of titanium alloy VT-1 electron beam in a vacuum / A.E. Lapina, N.N. Smirnyagina, D.E. Dasheev // Vestnik BSU. Chemistry. Physics. – 2018. – №. 2-3. – p. 55–63.
5. Antony Solomon.S. Simulation and Modeling of the Effect of Welding Process Parameters of Inconel 625 / Antony Solomon.S. // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2018. – V. 6, Issue 07.
6. Smirnyagina N.N. Phase equilibrium in system Ti-Si-C-B and synthesis of MAX phase layers in vacuum under the influence of electron beam / N.N. Smirnyagina, V.M. Khaltanova, D.E. Dasheev, A.E. Lapina // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – V. 830, № 012110.
7. Bohm S. Modellierung und Simulation des Elektronenstrahl- Schweißprozesses unter Berücksichtigung der Elektronenreflexion und der Elektronenstreuung / S. Bohm. – Aachen: Shaker. – 2020. – 123 P.
8. Язовский В.М. Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке круговых швов / В.М. Язовский, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Сварка и диагностика. – 2012. – №5. – с. 26–31.