

УДК 621.791.927

РАЗРАБОТКИ НИУ «МЭИ» В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ С ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

А. В. ЩЕРБАКОВ, Д. А. ГАПОНОВА, А. П. СЛИВА, Р. В. РОДЯКИНА, А. В. ГУДЕНКО, А. Л. ГОНЧАРОВ, В. К. ДРАГУНОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

UDC 621.791.927

DEVELOPMENTS OF NRU «MPEI» IN THE FIELD OF WIRE-BASED ELECTRON BEAM WELDING DEPOSITION CONTROL

A. V. SHCHERBAKOV, D. A. GAPONOVA, A. P. SLIVA, R. V. RODYAKINA, A. V. GUDENKO, A. L. GONCHAROV, V. K. DRAGUNOV

Аннотация. Показаны основные проблемы управления процессом электронно-лучевой наплавки с подачей присадочной проволоки при аддитивном формообразовании металлических изделий. Раскрыты технические решения, реализованные в НИУ «МЭИ» для автоматизации процесса аддитивного формообразования. Приведены особенности применения осцилляции электронного пучка для управления пятном нагрева и направленным переносом металла. Проведен анализ методов измерения расстояния «формируемый слой – электронная пушка» и поперечного профиля слоя. Описан прототип системы стабилизации температуры формируемого слоя.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, аддитивное формообразование, система управления, осцилляция электронного луча, датчики расстояния, датчики температуры, замкнутая система управления.

Abstract. The main problems of wire-based electron-beam deposition process control for additive manufacturing of metal products are shown. The technical solutions implemented in NRU «MPEI» for automating the process of additive shaping are disclosed. The features of the application of electron beam oscillations to control the heating spot and directed metal transfer are presented. The analysis of methods for measuring the distance «formed layer – electron gun» and the transverse profile of the layer is carried out. A prototype of the system for stabilizing the temperature of the formed layer is described.

Keywords: electron beam deposition, additive manufacturing, control system, electron beam oscillation, distance sensors, temperature sensors, closed loop control system.

Процесс электронно-лучевой наплавки с подачей присадочной проволоки подразумевает формирование изделий путем многослойной наплавки единичных металлических слоев по траекториям, задаваемым системой числового программного управления. На рис. 1 показана структура системы управления данным процессом, разработанной в НИУ «МЭИ».

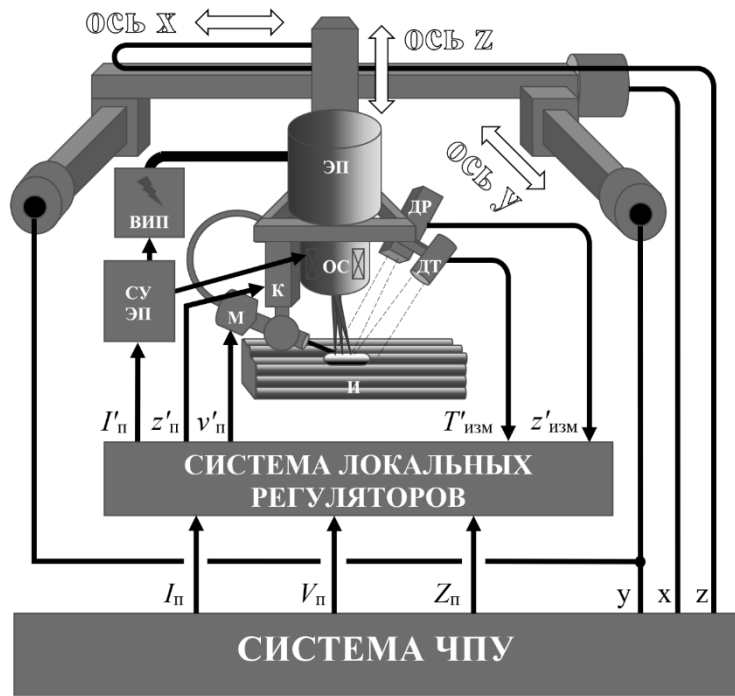


Рис. 1. Структура системы управления процессом электронно-лучевой наплавки, разработанной в НИУ «МЭИ» для реализации процесса аддитивного формообразования

Система числового программного управления (ЧПУ) установки управляет перемещением электронной пушки (ЭП) по трем ортогональным осям – x , y и z . Для работы ЭП необходимы высоковольтный источник питания ВИП и система управления СУ ЭП, обеспечивающая внешнее управление током электронного пучка $I_{п}$ отклоняющими системами ОС и работу других каналов управления электронной пушки (накал катода, фокусировка и т. д.). Для интеграции канала управления током электронного пучка в систему ЧПУ используется система локальных регуляторов, реализованная на микроконтроллере. Эта система формирует сигнал управления током $I'_{п}$ с характеристиками, регламентированными СУ ЭП (выходной сигнал ЧПУ $I_{п}$ является частотным, а входной сигнал СУ ЭП $I'_{п}$ инкрементным). ЧПУ задает скорость подачи проволоки $V_{п}$ и координату положения мундштука подачи $Z_{п}$. Скорость подачи регулируется роликовым механизмом М, а положение мундштука – корректирующим механизмом К. Сигналы управления этими механизмами на рис. 1 показаны как $v'_{п}$ и $z'_{п}$. Система оснащена датчиком температуры ДТ и датчиком расстояния ДР, обеспечивающими измерение температуры формируемого слоя и расстояния «электронная пушка – слой» соответственно. Сигналы этих датчиков $T'_{изм}$ и $z'_{изм}$ поступают в систему локальных регуляторов и обрабатываются программой микроконтроллера.

Для пояснения особенностей разработанных элементов системы управления процессом следует проанализировать основные особенности процесса многослойной наплавки в вакууме, проиллюстрированные рис. 2.

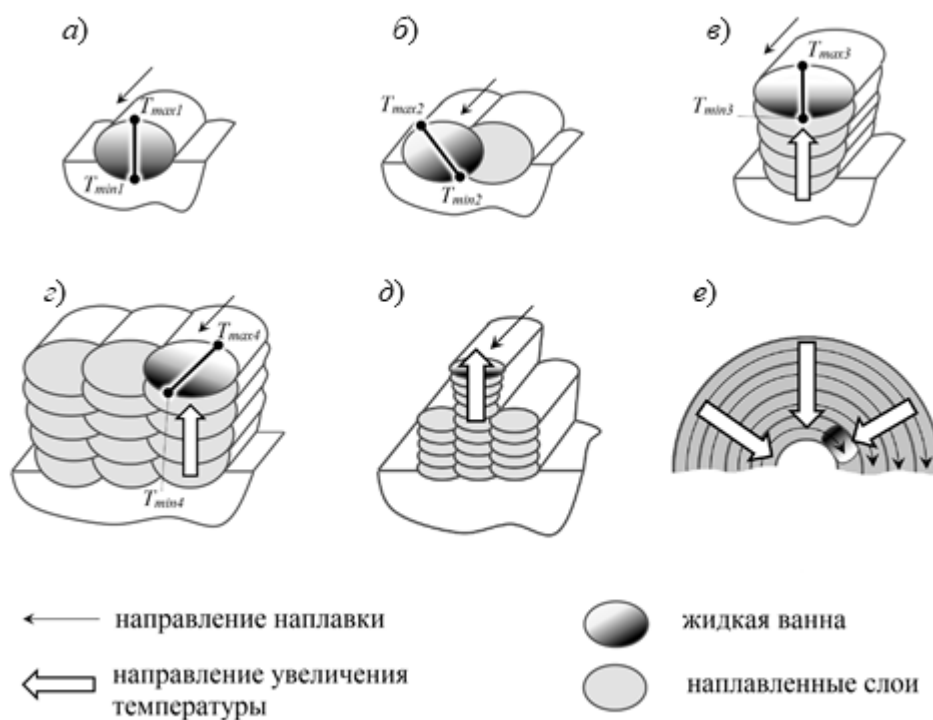


Рис. 2. Особенности формирования многослойных изделий электронно-лучевой наплавкой с подачей присадочной проволоки

При наплавке одиночного слоя (см. рис. 2, а) слой (валик) формируется с отношением высоты к ширине $0,2...1,5$. Температурное поле ванны в поперечном сечении будет практически симметричным относительно средней линии валика (максимальная и минимальная температуры в сечении ванны T_{max1} и T_{min1} показаны условно).

Если требуется наплавка нескольких параллельных валиков подряд (см. рис. 2, б), необходимо корректно выбрать расстояние между слоями. Методика выбора межцентрового расстояния описана во многих работах [1–4]. Отвод тепла от формируемого слоя справа и слева будет неодинаковым: из-за того, что тепло отводится к ранее наплавленному слою за счет теплопроводности, а со стороны, обращенной к вакууму, – за счет излучения, распределение температуры в жидкой ванне будет несимметричным (T_{max2} и T_{min2} на рис 2, б), что будет влиять на форму валика процессы кристаллизации.

При наплавке многослойной стенки толщиной в один валик возникает эффект влияния зон повторного нагрева (см. рис. 2, в), связанный с тем, что первый слой наплавляется на «холодную» подложку, а последующие слои – на подслои, имеющие более высокую температуру. В результате отношение высоты слоя к ширине изменяется: слои становятся все шире и все ниже, и скорость «выращивания» стенки будет снижаться, поэтому часто происходит отрыв проволоки от слоя, а температура ванны будет увеличиваться ($T_{max3} > T_{max1}$).

Аналогичные явления наблюдаются при наплавке массивных многослойных блоков (см. рис. 2, *з*). В этом случае на процесс будут влиять как зоны повторного нагрева, так и несимметрия температурного поля ванны, возникающая из-за различных механизмов отвода тепла. Это будет приводить к постепенному увеличению температуры от слоя к слою, увеличению объема ванны и отклонению ее формы от первоначальной.

Отклонения геометрических размеров слоя и температуры ванны также будут наблюдаться при изменении теплотехнической массивности примыкающих к ванне слоев (см. рис. 2, *д*) и изменении отношений размеров теплоотводящих поверхностей при изменении радиусов поворота траектории наплавки или их длины (см. рис. 2, *е*).

Описанные примеры показывают актуальность непрерывного контроля геометрических размеров наплавляемых валиков и их температуры, а также создания автоматических систем стабилизации соответствующих параметров процесса. Для контроля расстояния «электронная пушка – формируемый слой» можно использовать различные бесконтактные типы датчиков: оптические (времяпролетного типа [5], лазерные триангуляционные [6]), индукционные, радарные (радиочастотные [7]), а также детекторы рентгеновского излучения [8] и обратнорассеянных электронов [9].

Поскольку высота формируемого слоя обычно составляет единицы миллиметров, то дискретность измерения применяемого датчика расстояния должна быть как минимум на порядок меньше. Этим критериям отвечают лазерные измерители расстояния и 2D-сканеры триангуляционного типа. На рис. 3, *а* показана такая система, а в качестве примера использования системы на рис. 3, *б, в* приведены фотография наплавленных стенок и полученная геометрическая модель. На сканере 1 установлена система защиты от воздействия паров металла.

На рис. 3, *г, д* показаны фотографии системы с установленным пирометром 3 для измерения температуры подслоя. Температура измерялась на некотором расстоянии от точки действия луча – от 25 до 50 мм в области «позади» фронта кристаллизации ванны. Для защиты пирометра от воздействия паров металла была установлена трубчатая насадка 4. Для стабилизации температуры слоя были разработаны различные типы программных регуляторов: двухпозиционный, инкрементный, ПИ и ПИД. Было установлено, что приемлемое качество переходных процессов обеспечивается при использовании инкрементного способа управления и дискретного ПИ-регулятора. На рис. 3, *е* приведена осциллограмма, иллюстрирующая работу системы при инкрементном способе управления током электронного пучка.

Задание минимального значения необходимо для предотвращения режима, при котором погонная энергия недостаточна для полного расплавления проволоки, а максимального – для исключения перерегулирования при настройке коэффициентов передачи регулятора.

На рис. 3, *ж* приведен макрошлиф цилиндрического изделия из стали 316L, полученного при наплавке 54 слоев с применением системы стабилизации температуры.

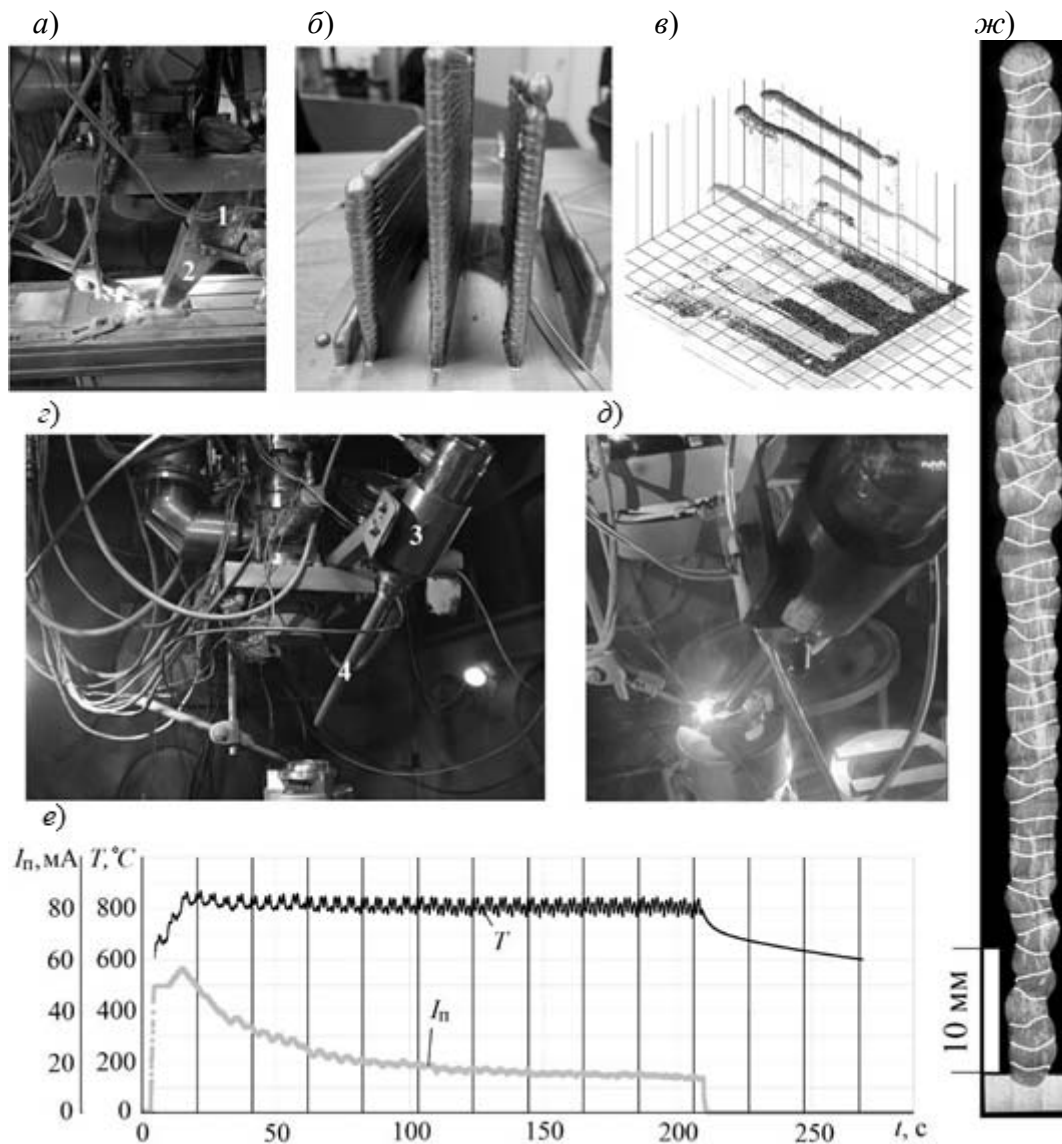


Рис. 3. Элементы системы управления процессом многослойной электронно-лучевой наплавки, разработанные в НИУ «МЭИ»: *а* – стенд с триангуляционным лазерным сканером; *б* – сканируемые изделия (наплавленные стенки); *в* – результат сканирования; *г* – стенд с пирометром для измерения температуры слоя; *д* – процесс наплавки с измерением температуры; *е* – типичные осциллограммы тока пучка I_n и температуры T ; *ж* – поперечный макрошлиф цилиндрической стенки из стали 316L, наплавленной со стабилизацией температуры слоя (линиями показаны границы слоев)

Заключение.

1. Проведен анализ факторов, приводящих к отклонению геометрических параметров формируемых слоев, а также структуры и свойств материала в процессе наплавки многослойных изделий. Показана необходимость корректировки положения точки ввода материала (присадочной проволоки) и стабилизации температуры формируемого слоя.

2. Описана структура многоконтурной системы управления процессом электронно-лучевой наплавки многослойных изделий, обеспечивающей непрерывный контроль параметров наплавки – расстояния между наплавляемым слоем и электронной пушкой и температуры слоя, а также их стабилизацию с помощью локальных программных регуляторов за счет изменения тока луча и корректировки положения мундштука подачи проволоки.

3. Показана принципиальная возможность стабилизации температуры наплавляемого слоя за счет изменения тока электронного пучка в процессе наплавки при использовании инкрементного или ПИ-регулирования.

Работы по разработке и наладке программного обеспечения системы управления выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Стипендии Президента Российской Федерации СП-2918.2021.1.

Работы по созданию аппаратной части системы управления процессом наплавки, технологические работы и контроль экспериментальных образцов выполнены в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWF – 2020-0023).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 81 (1–4). – P. 465–481.

2. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing / J. Xiong [et al.] // Robot Comput Integr Manuf. – 2013. – Vol. 29. – P. 417–423.

3. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping / W. Aiyiti [et al.] // Rapid Prototyp J. – 2006. – Vol. 12. – P. 165–172.

4. Wire-Based Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V Using Electron Beam Technique / F. Pixner [et al.] // Materials. – 2020. – Vol.13. – P. 3310.

5. **Hossein, Taheri.** Nondestructive evaluation and in-situ monitoring for metal additive manufacturing: Ph. D. dissertation / Taheri Hossein. – Iowa State University, 2018.

6. Режим доступа: <http://prizmasensors.ru/ls2d-triangulyacionnyj-lazernyj-2d-datchik/>.

7. Micrometer Sensing With Microwaves: Precise Radar Systems for Innovative Measurement Applications / F. Michler [et al.] // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Vol. 1, № 1. – P. 202–217.

8. Wire Position Sensor for Controlling the Process of Electron Beam Layer-by-Layer Deposition: Modeling and Verification / D. N. Trushnikov [et al.] // IEEE Sensors Journal. – Vol. 21, № 3. – P. 3134–3142.

9. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 969, 012105 / A. V. Shcherbakov [et al.]. – 2020.

E-mail: ShcherbakovAV@mpei.ru.