

Особенности управления процессом электронно-лучевого аддитивного формообразования

А. В. Щербаков, Р. В. Родякина, * А. С. Кожеченко,
Н. М. Вахмянин, Д. А. Гапонова, В. П. Рубцов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,
г. Москва, 111250, Россия, *e-mail: KozhechenkoAS@mpei.ru

Проведен анализ процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования путем наплавки валиков в результате переплавки подаваемой присадочной проволоки как объекта управления. Выделены управляющие воздействия и выходные переменные, которые целесообразно использовать для построения систем управления с обратными связями. Предложена методика математического моделирования для исследования процессов теплопереноса в нестационарной постановке с учетом влияния скрытой теплоты плавления. Исследованы переходные процессы изменения температур в точках, по значениям которых можно оценить протяженность сварочной ванны и степень перегрева металла. Проведен анализ результатов вычислительных экспериментов и показаны диапазоны изменения управляющих воздействий, а также обоснована возможность независимого регулирования температуры в области действия луча и протяженности жидкой ванны. Приведены рекомендации по технической реализации системы в области исполнения локальных регуляторов, типов датчиков и вариантов их установки.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевые технологии, системы управления технологическими процессами, математическое моделирование, нестационарная теплопередача, скрытая теплота плавления, многоконтурные системы управления.

УДК 621.7-52

DOI: 10.5281/zenodo.1228844

ВВЕДЕНИЕ

Первые промышленные технологии наплавки металлических материалов были внедрены еще в 1940-е годы. В этих процессах для наплавки присадочного материала применялась электрическая дуга. Значительно позже, в 1970-е годы, были разработаны серийные машины для сварки и наплавки с применением автоматической подачи присадочной проволоки, использующие не только дуговые, но и концентрированные источники нагрева – плазменную струю, лазерный и электронный лучи. Однако все перечисленные разработки применялись лишь для осуществления достаточно простых операций – ремонта и восстановления изношенных поверхностей простой формы (валов, рабочих кромок) с последующей механической обработкой, а также для сварки. Интерес к применению технологий наплавки металлических материалов для послойного синтеза конструкций возник после появления так называемых 3D-принтеров во второй половине 1980-х годов [1]. В результате во многих научных центрах была начата и ведется разработка установок для послойной наплавки изделий из металлических материалов на основе перечисленных технологий.

Одной из наиболее перспективных технологий аддитивного формообразования изделий из металлических материалов является техно-

логия электронно-лучевого послойного синтеза конструкций сложной формы путем наплавки валиков, формируемых переплавкой подаваемой присадочной проволоки – так называемая EBF³ технология [2]. Однако на текущем этапе развития данная технология имеет ряд существенных ограничений по областям применения и пока не может вытеснить широко применяемые методы механической обработки цельных заготовок. Это связано, во-первых, с непостоянством температурного режима жидкой ванны металла из-за влияния остаточного нагрева всей наплавляемой конструкции, а также с накоплением термических напряжений и возникновением деформаций изделия. Кроме того, из-за влияния зон повторного нагрева микро- и макроструктура формируемого материала также становится неоднородной, поэтому весьма вероятно появление анизотропии механических свойств.

В этой связи весьма актуальной задачей является разработка систем управления процессом наплавки с обратными связями (замкнутых систем). Уже сегодня имеются публикации и патенты, свидетельствующие о создании ряда прототипов таких систем [3, 4]. Так, известны системы, в которых в качестве источника информации о распределении температуры в жидкой ванне наплавляемого металла используется изображение, получаемое с помощью тепловизоров [5], сигналы единичных фотодетек-

торов или фотоприемных линеек ИК-диапазона [6].

В опубликованных работах показано, что построение замкнутых систем на базе тепловизоров и камер инфракрасного диапазона с многоэлементными детекторами затруднено из-за ряда факторов. К ним относятся: необходимость калибровки сенсоров камер по времени накопления сигнала под каждый наплавляемый материал (из-за различий в излучательной способности материалов), потребность в установке различных фильтров оптического излучения для устранения эффекта засветки изображения как для различных материалов, так и для разных режимов наплавки, ограниченная частота кадров для моделей с приемлемым пространственным разрешением и динамическим диапазоном (30–50 Гц), а также их высокая стоимость, сравнимая со стоимостью всей установки.

Использование в качестве датчиков приборов для измерения локальных значений температуры поверхности ванны металла также накладывает определенные технические ограничения. Так, современные промышленные пирометры имеют минимальный размер фокусного пятна 2,5–4 мм, что, как правило, превышает диаметр наплавляемой проволоки и соизмеримо с шириной наплавляемого валика. В то же время применение пирометров спектрального отношения позволяет отказаться от рутинной процедуры калибровки, исключить многие возмущающие факторы (присутствие паров металла, изменение фоновой освещенности), а время одного измерения в таких приборах не превышает 10 мс.

Вопрос выбора типа датчика не является единственной проблемой, возникающей при стремлении создать замкнутую систему управления процессом аддитивного формообразования. Для определения базовой структуры системы необходим предварительный анализ процесса послойной наплавки как объекта управления. Вне зависимости от типа используемого в перспективе датчика предлагается решить актуальную задачу разработки базовых принципов замкнутого управления наплавкой присадочной проволоки с учетом динамических процессов в жидкой ванне, обусловленных влиянием зон повторного нагрева. Решение этой задачи на данном этапе развития техники в упомянутой области позволит разработчикам систем управления выработать типовой подход и сформулировать требования к элементной базе датчиков и исполнительных устройств.

ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 1 показана функциональная схема процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования. Электронная пушка, состоящая из катода 1 из гексаборида лантана, нагреваемого до рабочей температуры 1600–1800 К [7] электронной бомбардировкой с вольфрамового проволочного подогревателя 2, анода 3 и управляющего электрода 4, формирует электронный пучок 6, который фокусируется магнитной линзой 5 в область расплавленной ванны 8.

В эту же область непрерывно подается присадочная проволока с помощью механизма 7, а сама пушка с механизмом подачи при этом движется по заданной траектории, за счет чего и происходит послойная наплавка валиков металла 9.

Для обеспечения работы пушки необходимы пять источников электропитания – ускоряющего напряжения PS1, бомбардировки катода PS2, накала подогревателя PS3, напряжения смещения PS4 и магнитной линзы (на рисунке не показано). Все источники оснащены стабилизаторами с обратными связями по току или напряжению, которые также не показаны на рисунке. При регулировании тока луча регуляторы трех источников питания работают в статическом режиме, обеспечивая неизменность ускоряющего напряжения, тока накала и бомбардировки. Изменяются только напряжение смещения и ток магнитной линзы. При изменении напряжения смещения (напряжения источника PS4) за счет изменения потенциала управляющего электрода относительно катодного потенциала изменяется проводимость анодной цепи электронной пушки. Это означает, что меняется и нагрузка источника ускоряющего напряжения PS1. Ток пучка при регулировании измеряется как ток источника питания PS1 (обозначен как I_b на рис. 1) и является сигналом обратной связи для источника PS4. Канал управления по току пучка является основным каналом регулирования энергии, подводимой к жидкой ванне металла. Ускоряющее напряжение U_a необходимо поддерживать неизменным во всем диапазоне регулирования тока I_b для сохранения постоянной энергии электронов в области магнитной линзы, что является крайне важным условием для поддержания положения плоскости фокусировки пучка в области ванны металла. Источники питания PS1–PS4 подключены к пушке с помощью высоковольтного кабеля, межпроводная емкость которого условно показана на рис. 1 как C_c .

Канал регулирования по току фокусировки магнитной линзы является вторым каналом, определяющим плотность теплового потока и

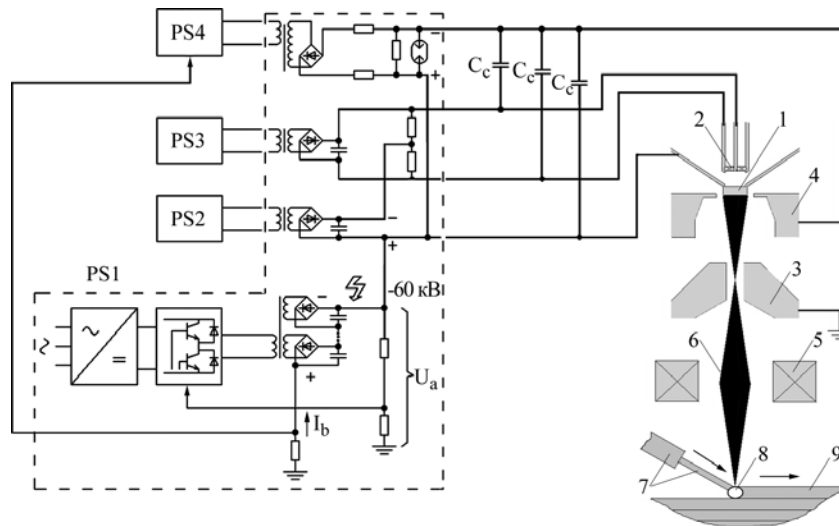


Рис. 1. Схема процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования: 1 – катод; 2 – подогреватель; 3 – анод; 4 – управляющий электрод; 5 – магнитная линза; 6 – электронный пучок; 7 – механизм подачи проволоки; 8 – жидкая ванна; 9 – наплавляемый слой (валик); PS1–PS4 – источники питания; U_a – ускоряющее напряжение; I_b – ток пучка; C_c – емкость кабеля.

размеры источника нагрева; а каналы по скорости подачи проволоки и скорости перемещения пушки – третьим и четвертым соответственно. В процессе наплавки каналы управления скоростью перемещения и подачей присадочного материала нецелесообразно применять как управляющие воздействия для ванны жидкого металла, что обусловлено их инерционностью. Таким образом, основными управляющими каналами для процесса электронно-лучевой послойной наплавки проволоки являются два: канал регулирования тока луча и канал регулирования тока фокусировки магнитной линзы. Все остальные параметры, оказывающие влияние на процесс, необходимо стабилизировать.

Выходными переменными для процесса электронно-лучевой наплавки как объекта управления могут являться: распределение температуры по поверхности наплавляемого валика или локальные значения температуры; геометрические параметры валика – ширина, высота, химический состав и физико-механические свойства наплавляемого материала. Распределение температуры поверхности может быть получено экспериментально с помощью тепловизионных устройств, локальные значения измерены с помощью пирометров, геометрические размеры могут быть определены с помощью оптических методов (видеосъемка, лазерные измерители расстояний) или электронно-оптических (по сигналам отраженных и вторичных электронов, получаемых при растровом сканировании маломощным электронным пучком). Химический состав сплава и его физико-механические свойства нельзя определить непосредственно в процессе наплавки,

однако они могут быть спрогнозированы по кривым охлаждения с использованием соответствующих фазовых диаграмм.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

Для детального исследования процесса наплавки как объекта управления в указанной постановке задачи при исключении неконтролируемых возмущающих факторов и погрешностей измерений приборов предлагается использовать метод математического моделирования. Процесс теплопереноса в наплавляемой конструкции удобно описывать в виде нестационарной задачи теплопроводности с движущимися во времени краевыми условиями, описывающими процесс введения присадочного материала. В декартовых координатах уравнение теплопроводности примет вид:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v - \frac{\partial \psi_m(T)}{\partial t} L_m \rho(T), \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $c(T)$ – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); $\rho(T)$ – плотность вещества, кг/м³; q_v – количество теплоты, выделяемое внутренними источниками в единице объема в единицу времени при воздействии электронного луча на материал, Вт/м³; x, y, z – декартовы координаты текущей расчетной точки, м; L_m – скрытая теплота плавления металла, Дж/кг; $\psi_m(T)$ – доля расплава в двухфазной области, рассчитываемая в каждом контрольном объеме в каждый момент времени по формуле:

Исходные данные для математической модели процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования

№	Параметр	Показатель	Единицы измерения
1	Материал	Сталь 12X18H10T	—
2	Теплоемкость при 20°C (1400°C)	110 (800)	Дж/(кг·К)
3	Теплопроводность при 20°C (1400°C)	11 (29)	Вт/(м·К)
4	Плотность	7800	кг/м ³
5	Скрытая теплота плавления	260	кДж/кг
6	Температура солидуса, T_S	1673	К
7	Температура ликвидуса, T_L	1729	К
8	Координатный шаг конечно-разностной сетки	0,125	мм
9	Временной шаг	0,0125	с
10	Скорость перемещения луча (и скорость подачи присадочного материала)	10–20	мм/с
11	Ускоряющее напряжение	60	кВ
12	Мощность пучка	0–1000	Вт
13	Эффективный радиус луча	0,25–1,5	мм

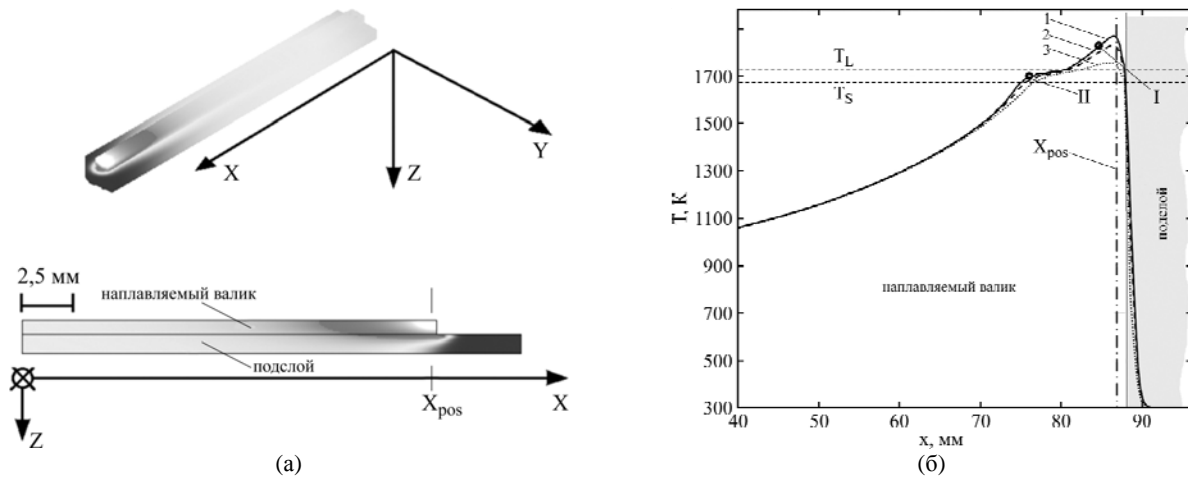


Рис. 2. Температурное поле (а) и распределения температуры вдоль оси x в квазистационарном режиме наплавки (б) при мощности пучка 800 Вт, эффективном радиусе пучка $r_{eff} = 1$ мм и скорости перемещения 17,5 мм/с: x_{pos} – x -координата оси пучка; 1 – распределение температуры вдоль оси x при $y = y_{pos}$ (на оси пучка); 2 – то же на расстоянии 0,5 мм от оси ($y = y_{pos} + 0,5$ мм); 3 – то же на расстоянии 1 мм от оси ($y = y_{pos} + 1$ мм); T_S – температура солидуса; T_L – температура ликвидуса; I, II – точки предполагаемого измерения температуры.

$$\psi_m(T) = \begin{cases} 0, & T < T_S \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S}, & T_S < T < T_L \\ 1, & T > T_L \end{cases} \quad (2)$$

В последнем выражении T_S и T_L – соответственно температуры солидуса и ликвидуса присадочного материала, К. Функция распределения количества теплоты, непрерывно выделяющегося в приповерхностном слое dz с z -координатой поверхности $z_{нов}$, имеет вид функции нормального распределения и определяется как:

$$q_i(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, & z < z_{нов} \\ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{r_{eff}^2} \cdot I_b \cdot U_a \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_{pos}(t))^2 + (y-y_{pos}(t))^2}{r_{eff}^2}\right)} \cdot \frac{1}{dz}, & z = z_{нов} \\ 0, & z > z_{нов} \end{cases} \quad (3)$$

где r_{eff} – эффективный радиус пучка; $x_{pos}(t)$, $y_{pos}(t)$ – координаты центра электронного пучка. На всех границах расчетной области задавались граничные условия Неймана. Задача, описы-

ваемая системой уравнений (1)–(3), решалась методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы и метода дробных шагов [8], реализованных в Microsoft Visual Studio. Данные, используемые при разработке модели, сведены в таблице. Процесс наплавки моделировался путем добавления на каждом временном шаге в область воздействия луча элемента высотой 1 мм, шириной 2,5 мм и длиной 0,125 мм.

На рис. 2а показаны внешний вид и геометрические размеры расчетной области в процессе наплавки, а также картина температурного поля, а на рис. 2б – характерные для применяемых на практике режимов наплавки распределения температуры вдоль оси x на различном расстоянии от оси электронного пучка.

Распределения температуры, приведенные на рис. 2, хорошо согласуются с экспериментальными данными и, несмотря на наличие областей с малыми производными температуры по координате x , которые соответствуют двухфазной зоне, можно считать, что в целом при постоян-

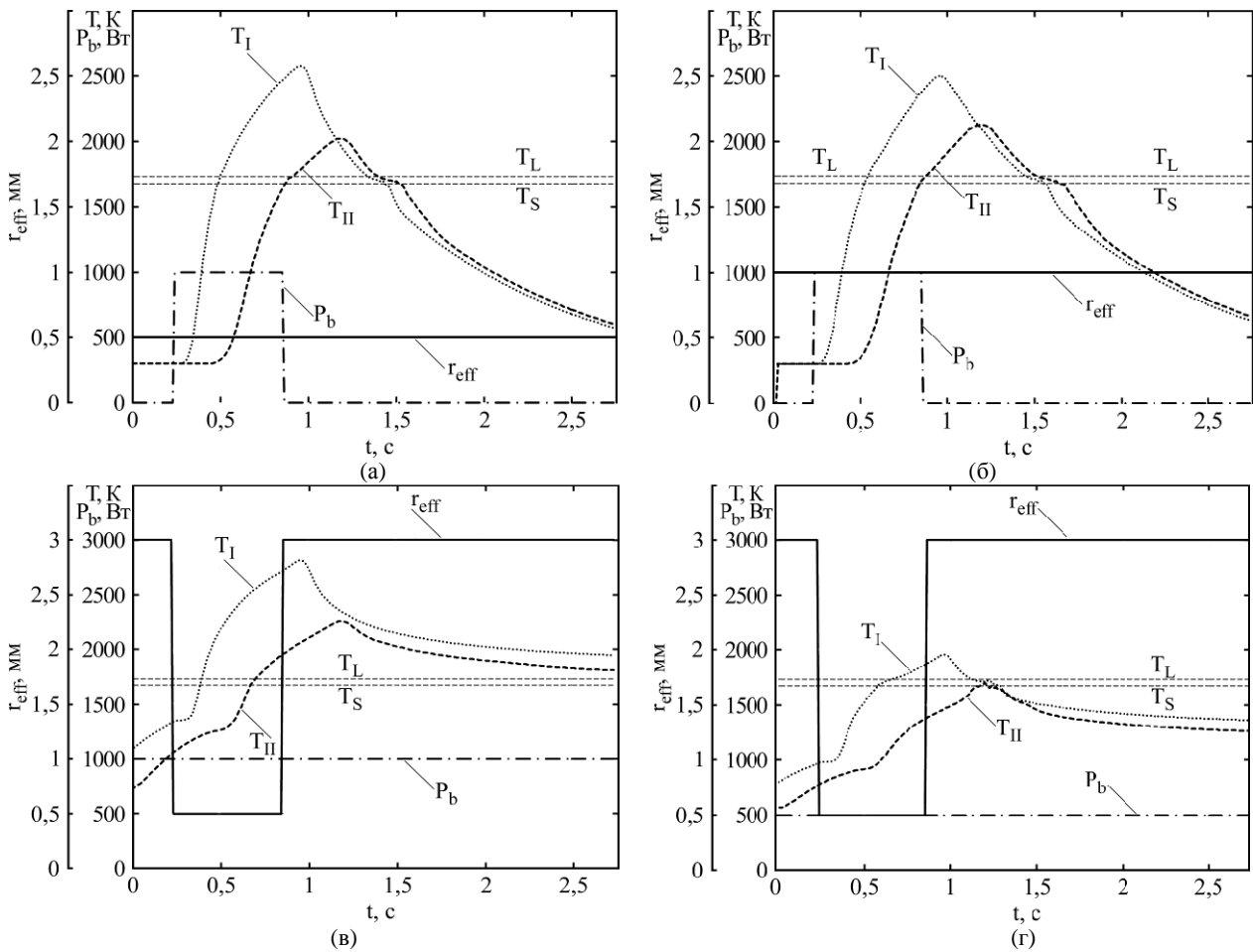


Рис. 3. Временные зависимости температур в точках I и II при: (а), (б) – ступенчатом изменении мощности пучка P_b ; (в), (г) – ступенчатом изменении эффективного радиуса пучка r_{eff} .

ном токе луча температура падает монотонно по мере удаления от области торможения электронов. Этот факт является первым подтверждением возможности использования замкнутых систем для стабилизации режима электронно-лучевой наплавки.

Более того, очевидно, что для измерения параметров жидкой ванны в процессе наплавки в простейшем случае достаточно проводить измерения температуры в двух характерных точках – точке, расположенной вблизи области воздействия луча (точка I на рисунке), – для измерения усредненной температуры металла, перегретого выше температуры T_L , а также в точке II, расположенной на некотором удалении от первой и соответственно от действующего луча. Температура в этой точке может, например, находиться в диапазоне между T_L и T_S , соответствующей двухфазной области или границе жидкой ванны. Однако для подтверждения технической реализуемости систем управления, использующих сигналы температур в указанных точках в качестве сигналов обратных связей, необходимы исследования статических и динамических режимов работы описанного выше объекта управления.

РЕАКЦИЯ ОБЪЕКТА НА ВХОДНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Основной интерес представляет реакция объекта на ступенчатые входные воздействия по обоим каналам управления. На рис. 3 показаны характерные изменения температур в точках I и II при ступенчатом изменении мощности пучка P_b , регулируемой за счет тока (рис. 3а,б) и его эффективного радиуса r_{eff} (рис. 3в,г), изменяемого за счет тока фокусировки. Вид зависимостей температуры $T_I(t)$ и $T_{II}(t)$ остается практически неизменным при варьировании входных переменных P_b и r_{eff} в довольно широких пределах.

Важный вывод, который был сделан в результате анализа временных зависимостей температуры $T_I(t)$ и $T_{II}(t)$ при различных значениях амплитуды P_b и r_{eff} , заключается в том, что постоянные времени нагрева материала в указанных точках не зависят от мощности луча или степени фокусировки, а определяются только поперечными размерами наплавляемого валика, теплофизическими свойствами присадочного материала и скоростью перемещения луча. На рис. 3 это подтверждается тем, что

максимумы температуры T_I достигаются по истечении одного и того же временного интервала после подачи импульса тока луча (ступенчато возрастающая мощность P_b) или импульса тока фокусировки (ступенчато убывающий r_{eff}) вне зависимости от амплитудных значений второго, неизменяемого воздействия. На рис. 3 длительность этого интервала составляет 0,65 с. Аналогично максимум температуры T_{II} достигается спустя 0,95 с после прохождения переднего фронта импульса тока луча при постоянном токе фокусировки или импульса тока фокусировки при постоянном токе луча. Эти значения временных интервалов получены при моделировании наплавки валиков из стали 12X18H10T с поперечным сечением $2,5 \times 1$ мм со скоростью движения луча 17,5 мм/с.

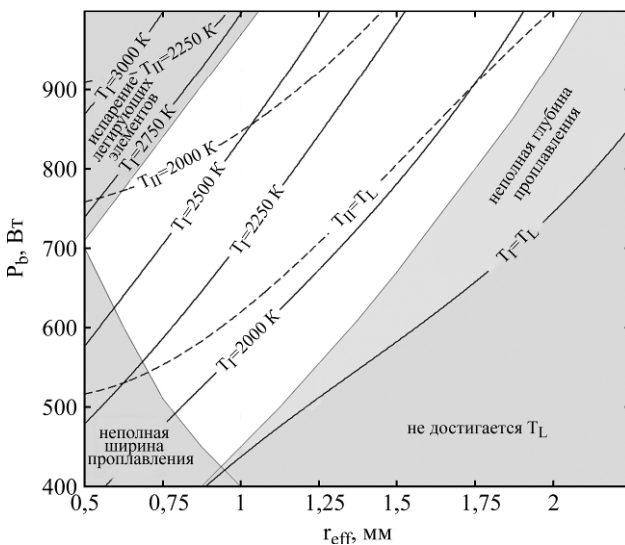


Рис. 4. Зависимости температуры T_I и T_{II} в точках, расположенных позади движущегося электронного пучка на расстоянии 3 и 8 мм в стационарном режиме жидкой ванны, от мощности луча P_b и его эффективного радиуса r_{eff} .

Ограничения диапазонов изменения мощности луча и его эффективного радиуса определяются необходимостью обеспечения полного проплавления подаваемого присадочного материала. Так, при слишком «острой» фокусировке пучка, то есть при малых значениях r_{eff} , возможна ситуация, при которой подаваемая проволока будет оплаиваться лишь частично, в центральной части. И, наоборот, при слишком «мягкой» фокусировке, то есть при больших значениях r_{eff} плотность теплового потока будет недостаточна для расплавления материала за время воздействия или будет оплаиваться только его приповерхностный слой. На рис. 4 графически показаны полученные в результате проведения вычислительных экспериментов зависимости температуры в точке T_I , расположенной на расстоянии 3 мм позади оси симметрии луча на наплавляемом валике, и температуры в точке T_{II} , расположенной на расстоянии 8 мм позади оси

симметрии луча на наплавляемом валике, от двух основных влияющих факторов – мощности луча P_b и радиуса луча r_{eff} .

Все значения температур T_I и T_{II} рассчитаны для установившегося режима наплавки при исключении каких бы то ни было возмущающих факторов. Время достижения стационарного режима наплавки, при котором температуры T_I и T_{II} перестают изменяться во времени, – 1,75 с. Скорость движения луча – 17,5 мм/с. В результате экспериментов были получены две табличные функции поверхности $T_I = f(P_b, r_{eff})$ и $T_{II} = f(P_b, r_{eff})$. Для облегчения восприятия полученной в результате экспериментов информации на рис. 4 показаны только линии равной температуры для значений $T_I = T_L(1729\text{К})$, 2000 К, 2250К, 2500 К, 2750 К и 3000 К, а также для $T_{II} = T_L$, 2000 К и 2250 К. Все промежуточные значения температур в двух точках могут быть получены методом линейной интерполяции.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что область изменения входных переменных является весьма ограниченной. Так, полное плавление присадочного материала обеспечивается при мощности не менее 430 Вт и радиусе луча 0,9 мм. Фокусировка луча при этой же мощности вызывает переход к режиму с неполной шириной проплавления, а расфокусировка – к оплавлению лишь тонкого приповерхностного слоя. Дальнейшее снижение плотности мощности луча (увеличение r_{eff}) приводит к снижению температуры в точке T_I ниже температуры ликвидуса. Следует отметить, что при указанной мощности луча температура T_{II} оказывается заметно ниже температуры ликвидуса и составляет примерно 1520 К. На практике переход к режиму с острой фокусировкой вызывает появление брызг металла и нестабильный режим формирования жидкой ванны, что обусловлено гидро- и газодинамическими процессами, не учитываемыми при моделировании в описываемой постановке.

С увеличением мощности луча диапазон регулирования степени фокусировки луча заметно увеличивается. Так, например, при мощности луча 700 Вт радиус луча может варьироваться от 0,5 до 1,6 мм. Однако при дальнейшем повышении мощности область допустимых значений управляющих воздействий смещается в сторону увеличения радиуса луча. Это связано с тем, что при высоких мощностях и малых диаметрах луча температура расплава может достигать температуры испарения отдельных легирующих компонентов, что ведет к существенному изменению физико-механических свойств наплавляемого материала. В этом же диапазоне мощностей достижение температуры в точке T_I

выше температуры ликвидуса без перегрева расплава, возможно, за счет сильной расфокусировки пучка – при радиусах r_{eff} до 2 мм. Однако в таком режиме будет наблюдаться существенный разогрев всей наплавляемой конструкции и в примыкающих к месту наплавки областях. Поэтому как увеличение мощности пучка до значений более 1000 Вт, так и дальнейшая расфокусировка пучка оказываются нецелесообразны из-за значительного снижения энергетической эффективности процесса.

Основной результат исследований, представленный на рис. 4, следует из того, что изотермы T_I и T_{II} не параллельны. Это позволяет сделать важный вывод: перемещение вдоль любой из изотерм T_I , осуществимое путем совместной регулировки мощности и эффективного радиуса луча, приводит к изменению температуры T_{II} в установившемся режиме наплавки. Данный вывод подтверждает правильность выбранных входных величин, а также техническую реализуемость систем стабилизации температуры и размеров жидкой ванны. Так, например, для движения вдоль изотермы $T_I = 2500$ К слева направо необходимо увеличивать как мощность луча P_b , так и его эффективный радиус r_{eff} . При движении в этом направлении температура в точке T_{II} будет непрерывно расти, что связано с увеличением размеров пятна нагрева. При $r_{eff} = 1,05$ мм температура T_{II} достигает 2500 К, а при дальнейшем увеличении радиуса и мощности луча будет расти и дальше.

Очевидно, что для создания системы управления, обеспечивающей одновременное регулирование тока луча и тока фокусировки магнитной линзы по сигналам температурных датчиков, необходимо решить множество технических задач, связанных с нелинейностью объекта управления, инерционностью локальных регуляторов и некоторыми другими факторами.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

На первом этапе необходимо убедиться в независимом действии выбранных каналов регулирования – по току луча и току магнитной фокусировки. В типовых конструкциях электронных пушек, применяемых для сварки и наплавки, при регулировании тока пучка за счет напряжения смещения, как правило, наблюдается смещение плоскости фокусировки, связанное с изменением электрического поля вблизи катода. При сварке эффект смещения плоскости фокусировки не всегда принимают во внимание, поскольку уменьшают ток чаще всего при замыкании швов, когда хотят предотвратить

образование кратера. Исключение, пожалуй, составляют только тонкостенные изделия. В случае наплавки изделий сложной формы переменного сечения, с учетом влияния зон повторного нагрева, когда может потребоваться довольно «глубокое» регулирование тока, этим эффектом пренебрегать нельзя. На сегодняшний день предельное разрешение для установок электронно-лучевой наплавки составляет 1 мм по ширине и 0,3 мм по высоте валика, а реализованные в коммерческих образцах поперечные размеры валиков составляют порядка 10 мм [9]. Таким образом, очевидна необходимость поддержания неизменности фокусировки пучка в области наплавки при регулировании тока. Для решения этой задачи введение канала динамической коррекции фокусировки нецелесообразно. Это обусловлено тем, что, во-первых, связь между током луча и требуемым током фокусировки нелинейна, а, во-вторых, сам коэффициент передачи по току фокусировки пришлось бы постоянно корректировать из-за изменения эмиссионных свойств катода в процессе его работы или после его замены. По этой причине наиболее рациональным методом регулирования тока луча является метод двухпозиционного регулирования, при котором напряжение смещения может принимать только две величины – номинальное значение, соответствующее номинальному току луча, и напряжение запирающего, при котором ток луча равен нулю. В таком режиме регулирования коррекция фокусировки не требуется, а эквивалентная мощность, выделяемая в жидкой ванне, может регулироваться за счет частоты и длительности импульсов тока луча.

Период модуляции тока пучка при таком регулировании должен быть примерно на 2 порядка меньше периода установления стационарного режима наплавки. Этот период может составлять от десятых долей секунд до нескольких секунд в зависимости от сечения наплавляемого валика, а частота модуляции соответственно должна варьироваться в диапазоне от сотен герц до килогерц.

Крайне важным техническим обстоятельством является регулирование эквивалентных размеров пятна нагрева в области наплавки. Поскольку в существующих конструкциях пушек радиальное распределение пучка отличается от функции нормального распределения, описываемой уравнением (3), и может иметь резкие периферийные границы и провалы плотности тока, то более рациональным методом регулирования размеров пятна нагрева является динамическое отклонение пучка в магнитном поле, реализуемое с помощью входящих в стан-

дартное оборудование пушки отклоняющих катушек. Частота отклонения луча должна выбираться с учетом тех же рекомендаций, что и частота модуляции тока. Форма траектории перемещения луча практически не ограничена и может представлять собой сложные пространственные линии, перемещаясь по которым луч будет одновременно нагревать и проволоку, и сам валик [10].

И наконец, наиболее важным аспектом является выбор типов датчиков и методов измерения температур T_I и T_{II} . Следует учесть два фактора. Во-первых, скорость выравнивания температуры в реальности, то есть при учете конвективного теплообмена, может быть выше, чем в рассмотренном случае, поэтому определение минимального времени отклика пирометров и определение точек измерения температуры, а также их значений, остаются задачей, требующей дальнейшей проработки на этапе создания прототипа установки. И во-вторых, как справедливо отмечено в ряде работ [11], даже детальная информация о распределении температуры по поверхности ванны металла не может дать сведений о ее распределении по глубине формируемого валика. Эта техническая проблема, возникающая при наплавке материалов, подаваемых в виде порошков, в рассматриваемом случае может быть решена за счет переноса точки измерения температуры T_I на подслою перед движущимся лучом непосредственно в область подачи присадочной проволоки. Причем в этом случае все принципиальные результаты, полученные в ходе описанного в статье исследования, остаются актуальными, а структура системы не изменяется.

Следует отметить, что приведенные результаты могут быть масштабированы и для других областей изменения входных величин – скорости наплавки, мощности, диаметра пятна нагрева, скорости подачи проволоки и сечения наплавляемого валика. Качественные отличия зависимостей, полученных для других режимов наплавки, могут быть связаны с изменением режима переноса металла, и в этом случае предоставляется возможность установления соответствующих критериев применяемым в этой области исследователями в настоящее время [11]. Однако для верификации результатов таких исследований необходимо проведение серий экспериментов с использованием тепловизионного оборудования и последующий анализ формы, структуры и свойств наплавляемого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ процесса послойной электронно-лучевой наплавки присадочной

проволоки как объекта управления. Установлено, что основными каналами регулирования, которые необходимо варьировать в процессе аддитивного формообразования, являются два, а именно: канал управления по току пучка и току фокусировки магнитной линзы. В качестве выходных каналов для объекта управления целесообразно использовать каналы измерения температуры в нескольких (как минимум двух) точках вблизи действия электронного луча с помощью приборов, в которых компенсируется изменение излучательной способности материалов, например пирометров спектрального отношения.

2. Предложена математическая модель процесса наплавки на основе численного метода решения нестационарной задачи теплопередачи в декартовой системе координат с учетом нелинейности коэффициентов дифференциального уравнения, а также скрытой теплоты плавления и кристаллизации и показана возможность ее применения для анализа переходных процессов в системе управления установкой электронно-лучевой наплавки. Показана связь результатов моделирования с результатами, получаемыми на практике, а также их отличия, обусловленные тем, что в модели не рассмотрены процессы переноса жидкого металла.

3. Проведены серии вычислительных экспериментов, которые позволили установить возможность независимого управления температурой сварочной ванны и ее протяженностью, используя информацию о температуре в двух точках, расположенных вблизи действия электронного луча – T_I и T_{II} . Непараллельность изотерм, лежащих на поверхностях $T_I = f(P_b, r_{eff})$ и $T_{II} = f(P_b, r_{eff})$, полученных в результате вычислительных экспериментов, и их взаимное расположение подтвердили возможность независимого управления температурами в точках T_I и T_{II} с использованием входных воздействий – мощности луча P_b и его эффективного радиуса r_{eff} . Установлены диапазоны изменения указанных входных воздействий для обеспечения стационарных режимов наплавки, а также общие принципы использования соответствующих каналов управления для компенсации возмущений во время осуществления технологического процесса.

4. На основании проведенных исследований статических и динамических характеристик процесса наплавки как объекта управления с учетом накопленного опыта в области электронно-лучевых технологий предложены базовые технические решения для реализации системы, включающие в себя системы импульсного регулирования тока пучка, его динамическое откло-

нение, а также возможность установки датчика температуры перед движущимся лучом для контроля полного проплавления проволоки. Определены амплитудные и частотные диапазоны регулирования основных параметров исполнительных регуляторов установки – мощности пучка и размеров пятна нагрева.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" за счет средств гранта Российского научного фонда, проект №17-79-20015.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charles W. Hull. *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US Patent 4,575,330 A. Published March 11, 1986.
2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer-Verlag, 2015. 498 p.
3. Stecker S. *Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored loop control*. US Patent 8,598,523 B2. Published December 3, 2013.
4. Taminger K.M., Hafley R.A., Martin R.E., Hofmeister W.H. *Closed-loop process control for electron beam freeform fabrication and deposition processes*. US Patent 8,452,073 B2, Published May 28, 2013.
5. Zalameda J.N., Burke E.R., Hafley R.A., Taminger K.M. et al. *Proc. SPIE 8705, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV*, 8705OM. 2013, doi:10.1117/12.2018233.
6. Everton S.K., Hirscha M., Stravroulakis P., Leach R.K. et al. *Mater Design*. 2016, **95**, 431–445.
7. Кресанов В.С., Малахов Н.П., Морозов В.В. и др. *Высокоэффективный эмиттер электронов на основе гексаборида лантана*. М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Самарский А.А., Гулин А.В. *Численные методы*. М.: Наука, 1987.
9. Seufzer W.J., Taminger K.M. *Control of Space-Based Electron Beam Free Form Fabrication*. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070030308.pdf>
10. Taminger K.M., Hofmeister W.H., Hafley R.A. *Use of beam deflection to control an electron beam wire deposition process*. US Patent 8,344,281 B2, Published January 1, 2013.
11. Raghavan A., Wei H.L., Palmer T.A. and DebRoy T. *J Laser Appl*. 2013, **25**, 052006. doi: 10.2351/1.4817788.

Поступила 01.12.17

После доработки 24.01.18

Summary

The article analyzes the electron-beam additive form fabrication process by beading as a result of remelting of the supplied filler wire as a control object. Control actions and output values are designated, which are expedient for usage in constructing control systems with feedbacks. A mathematical modeling technique to study heat transfer processes in a nonstationary formulation is proposed, taking into account the influence of latent heat of fusion. The transient processes of temperature changes at the points were studied, the values of which can be used to estimate the extent of the weld pool and the degree of metal overheating. An analysis of the results of computational experiments is carried out and the ranges of variations of control actions are shown. A possibility of an independent temperature control in the range of the beam and the extent of the liquid bath is also justified. Recommendations are given on the technical implementation of the system and the options for implementing local regulators, types of sensors and their installation.

Keywords: additive technologies, electron-beam technologies, process control systems, math modeling, non-stationary heat transfer, latent heat of fusion, multi-loop control systems.