кислорода, а, следовательно, в атмосферу не попадает лишнего углекислого газа. В небоскребе также обеспечивается экономия воды и применяется целый ряд современных энергосберегающих технологий, включая «зеленые» системы отопления и кондиционирования помещений. [5]

Рассматривая историю высотного строительства и постройки современности, хочется «заглянуть в будущее» и, проанализировав проекты высотных зданий, которым только предстоит быть построенными, можно сделать вывод, что применение ВИЭ становится приоритетным при проектировании высотных зданий.

1. Лотникова Д.Ю. История и методология транспортных процессов: учеб. пособие / Д.Ю. Лотникова, В.В. Нагорный. – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2021. – 199 с. ISBN 978-5-8333-1049-6
2. Нагорный В.В. Основные проблемы безопасности дорожного движения в городе Краснодаре за 2020 год / В.В. Нагорный, Д.Ю. Лотникова – Текст непосредственный // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ" - 2020. - № 7. - С. 202-207.
3. Лотникова Д.Ю. Проблемы функционирования систем транспорта России. / Д.Ю. Лотникова, В.В. Нагорный – Текст : непосредственный // в сборнике : Проблемы функционирования систем транспорта. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет». 2020г. - С. 412-413. – Текст : непосредственный
4. Коротич М.А., Коротич А.В. Композиционные особенности структурного формообразования оболочек высотных зданий // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2009. № 2. С. 66–69.
5. Магай А.А. Архитектурное проектирование высотных зданий и комплексов. М.: АСВ, 2015. 245 с.
6. Кузнецов С.Г. Формирование территории застройки с учетом аэродинамических характеристик высотного здания: автореф. дис. канд. техн. наук. – Магеевка, 1999. – С. 2-4,11.
7. Бессонова О. Жилищная модель на современном этапе // ЭКО. 2009. № 7. С. 59–70

Шатагин Д.А., Аносов М.С., Клочкова Н.С., Абрамович Е.Д.
Оптимизация режимов 3D-печати электродуговой наплавкой с использованием
цифрового двойника процесса

*Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева
 (Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/trnio-12-2021-154

Аннотация

В статье предложен способ выбора оптимальных режимов 3D-печати электродуговой наплавкой на станках с ЧПУ с использованием цифрового двойника процесса. В качестве цифрового двойника использована нейросетевая модель, аппроксимирующая зависимости устойчивости процесса наплавки и геометрические параметры печатаемого слоя от режимов наплавки: напряжения, силы тока и минутной подачи. Показана возможность оптимизации режимов 3D-печати с использованием нейросетевого моделирования на основе модифицированного метода обратного распространения ошибки.

Ключевые слова: 3D печать, машинное обучение, аддитивное производство методом дуговой сварки, цифровой двойник, гибридная система, киберфизическая система, оптимизация, нейронная сеть.

Abstract

The article proposes a method for choosing the optimal modes of 3D printing by electric arc surfacing on CNC machines using a digital twin of the process. As a digital twin, a neural network model is used that approximates the dependence of the stability of the surfacing process and the geometric parameters of the printed layer on the surfacing modes: voltage, current and minute feed. The possibility of optimizing 3D printing modes using neural network modeling based on a modified backpropagation method is shown.

Keywords: 3D printing, machine learning, WAAM, digital twin, hybrid system, cyber-physical system, optimization, neural network.

Актуальной задачей современного аддитивного производства является обеспечение качества продукции, обусловленного гарантированным составом, структурой и свойствами материала. Как показывают исследования [1, 2, 3, 4], решение данной задачи возможно за счет комбинации двух принципиальных подходов к производству: выбора оптимальных режимов наплавки, обеспечивающих устойчивый перенос материала, и диагностики процесса 3D-печати. Выбор оптимальных режимов возможен на основе моделирования электродуговых процессов с использованием математической модели динамического состояния электрической дуги. При этом электрическая дуга может рассматриваться в качестве нелинейной нагрузки в соответствии с общей математической моделью динамической дуги (ММДД) [5, 6, 7]:

$$\theta \frac{di_{\theta}}{dt} + i_{\theta}^2 = i^2$$

где, θ – постоянная времени дуги, i_{θ} – динамическое значение тока дуги, i – фактическое значение тока;

Нелинейная статическая вольтамперная характеристика (ВАХ) электрической дуги в общем случае может быть получена с использованием функции вида:

$$U(i_{\theta}) = U_0 \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^n$$

где, I_0 и U_0 – установившиеся значения силы тока и напряжения в соответствии с ВАХ.

В данной работе, рассматривалась жесткая ВАХ электрической дуги. В общем случае она применима для сварочных процессов плавящимися электродами при средних значениях силы тока. Исходя из этих соображений, показатель степени ВАХ обращается в ноль, а выше представленная функция приобретает вид:

$$U(i_{\theta}) = U_0 \operatorname{sgn}(i_{\theta})$$

В таком случае для описания динамики электрической дуги возможно применение модели Касси, которая в свою очередь выводится из общей математической модели динамической дуги, при нулевом показателе степени ВАХ:

$$\theta \frac{dg^2}{dt} + g^2 = \frac{i^2}{U_0^2}$$

где, g – электрическая проводимость.

Данная модель позволяет рассматривать процесс горения дуги только с постоянным дуговым промежутком (неплавящимся электродом). Поэтому, практический интерес моделирования представляет прежде всего качество переходного процесса. Параметры источника питания и нагрузки, выбирались для конкретного исследуемого технологического режима. Значения постоянной времени модели и электрической проводимости приняты: $g = 1 \cdot 10^4$ (См) и $\theta = 1.5 \cdot 10^{-6}$ (с) соответственно. На рисунке 1 показан пример результатов моделирования переходного процесса в электрической дуге в среде Matlab Simulink. Использование различных комбинаций режимов наплавки в ходе моделирования, позволило получить семейство эталонных кривых и их параметров, в частности: амплитуда, перерегулирование и время переходного процесса.

Рисунок 1. Результаты численного моделирования переходного процесса в электрической дуге

Однако, полученная модель носит обобщающий характер и не отражает особенности конкретной технологической единицы. Поэтому необходимо проведение серии уточняющих экспериментов, для создания моделей на основе подхода «серого ящика», сочетающих преимущества как аналитических, так и статистических методов. При этом необходимо определить значения параметров электрической дуги, характеризующих устойчивый и неустойчивый перенос металла.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования устойчивости процесса 3D-печати на основе анализа динамического состояния электрической дуги производились на специально разработанном стенде (рисунок 2).

Рисунок 2. Экспериментальный стенд для 3D-наплавки на базе станка с ЧПУ (1-3 координатный станок с ЧПУ портального типа) 2 – широкополосный датчик акустической эмиссии GT350, 3 – ПК с системой беспроводного доступа к облачному сервису Microsoft Azure, 4 – мощные датчики силы тока и напряжения, 5 – АЦП/ЦАП, 6 – система ЧПУ, 7 – сварочный полуавтомат, 8 – облачный сервис Microsoft Azure, 9 – баллоны с газом

В состав стенда входит станок с ЧПУ портального типа, система электродуговой наплавки Alloy 75ME Pulse, датчик силы тока в электрической дуге SC145-600, датчик измерения напряжения электрической дуги SV025, датчик акустической эмиссии GT200, аналогово-цифровой преобразователь NI 6356 и NI 9205, шина сбора данных NI cDAQ-9188, ПК для сбора и обработки данных. В ходе эксперимента, на станке осуществлялась печать металлических образцов из сварочной проволоки ER70S6 в широком диапазоне режимов наплавки ($U=16..30$ В, $I=90..270$ А, $S_m=100..800$ мм/мин). В качестве регистрируемых параметров, принимались фактические значения силы тока, напряжение и сигналы акустической эмиссии в виде временных рядов (рисунок 3).

Рисунок 3. Осциллограммы тока, напряжения, и сигнала акустической эмиссии при устойчивом и неустойчивом процессе переноса металла. Внешний вид слоя напечатанного металла при различных режимах наплавки.

На следующем этапе происходила разметка данных, где каждому из исследуемых режимов присваивалось значение «устойчивый» (Stab yes) и «неустойчивый» (Stab no). Разметка данных осуществлялась на основе экспертного анализа осциллограмм сигналов и визуального осмотра наплавленного слоя.

Анализ результатов экспериментального исследования

Анализ показал, что режимы наплавки, характеризующиеся неустойчивым переносом материала, приводят к возникновению дефектов в материале и неравномерности сечения слоя. При этом, наиболее информативными параметрами электрической дуги характеризующих устойчивость процесса являются: значение перерегулирования напряжения и длительность цикла горения дуги (рисунок 4).

Рисунок 4. Распределения значений перерегулирования (а) и длительности цикла (b) для устойчивых (yes) и неустойчивых (no) режимов

Следующей важной задачей при назначении режимов 3D-печати является выбор параметров сечения слоя (высота (H) и ширина (B)). Это необходимо для определения стратегии наплавки при подготовке управляющих программ и расчета припуска на последующую механическую обработку. Поэтому, в ходе экспериментальных исследований, дополнительно происходил замер геометрических параметров сечения слоя в 10 различных точках и расчет среднего значения. Пример зависимости ширины слоя от режимов наплавки показаны на рисунке 5.

Рисунок 5. Зависимость ширины слоя (B) от значения напряжения электрической дуги (U) и тока (A)

Из рисунка 5 видно, что увеличение режимов наплавки, а соответственно и удельной подводимой энергии, приводит к росту геометрических параметров сечения слоя. При этом наблюдаются зоны возникновения дефектов и нестабильного переноса металла. Подобные

гиперплоскости были построены для различных значений подач. Таким образом, в ходе экспериментальных исследований была получена выборка данных, характеризующая режимы 3D-печати, устойчивость процесса и параметры сечения слоя. Данная выборка использовалась в виде обучающей при построении цифрового двойника процесса 3D-печати с использованием аппарата искусственных нейронных сетей. В качестве основы нейросетевой модели была выбрана искусственная нейронная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем. В качестве активационной функции нейронов использовался гиперболический тангенс. Обучение модели происходило с использованием метода обратного распространения ошибки. Входом нейросетевой модели являются: напряжения дуги (U), сила тока (I) и значение минутной подачи. Выходными параметрами модели являются: устойчивость процесса (1 или 0), высота (H) и ширина слоя (B) (рисунок 6 (а)). Обучение модели происходило в среде Matlab. Полученная модель может использоваться для оценки устойчивости и геометрических параметров сечения слоя при назначении новых режимов. Однако, на практике необходимо назначать заведомо устойчивые режимы 3D-печати с заданными параметрами сечения слоя, при этом необходимо решить задачу оптимизации по 3-м критериям (устойчивость, H и B). Особенностью обратного распространения ошибки, при обучении искусственных нейронных сетей, является использование градиентных методов оптимизации, которые можно применить к уже обученным нейросетям при их некоторой доработки. Для этого в предложенной нейросетевой модели были зафиксированы значения весов нейронных связей в скрытом слое и добавлен новый входной слой. Новый входной слой имеет то же количество нейронов, что и в исходной модели. При этом значение входных нейронов приравнивается единице, а каждому нейрону присваивается вес (W_1 , W_2 , W_3). Значения выходных нейронов назначаются в соответствии с задачами оптимизации. После данной доработки запускается процесс обучения, при этом происходит корректировка только 3 весов нового входного слоя (W_1 , W_2 , W_3) (рисунок 6 (б)). Полученные после обучения значения весов W_1 , W_2 , W_3 являются оптимальными режимами, отвечающими заданным критериям оптимизации.

Рисунок 6. Нейросетевая модель процесса 3D-печати (а) и процесс оптимизации режимов наплавки (б)

Выводы.

1. Установлено, режимы 3D-печати электродуговой наплавкой в значительной степени определяют устойчивость процесса переноса материала и геометрические параметры сечения печатаемого слоя.
2. Предложена статистическая модель (цифровой двойник) процесса 3D-печати в виде искусственной нейронной сети прямого распространения. Модель связывает режимы наплавки с параметрами сечения слоя и устойчивостью процесса.

3. Разработан способ оптимизации режимов 3D-печати электродуговой наплавкой с использованием цифрового двойника на основе модифицированного метода обратного распространения ошибки. Способ позволяет в автоматическом режиме назначать режимы наплавки, соответствующие заданными критериями оптимизации.

1. На. Лв, Цзиюн Чжун, Хуабинь Чен, Шанбен Чен, Контроль проникновения сварки в реальном времени во время динамического процесса роботизированного GTAW с помощью звукового определения длины дуги, Международный журнал передовых производственных технологий 74(1-4):235-249;
2. Чао Чен, Раньцюань Сяо, Хуабинь Чен, На Лв, Модель дугового звука для импульсного GTAW и распознавания различных состояний проникновения, Международный журнал передовых производственных технологий 108(1-4)
3. Дмитрий Шатагин, Андрей Галкин, Александр Н.Осмехин, Наталья Ключкова, Форум по материаловедению (Том 1037), 2021, стр.119-124;
4. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Колчин П.В., Киселев А.В., Диагностика процесса печати 3D на станке с ЧПУ с использованием подходов машинного обучения, 2021. № 1. с. 55-59.
5. Пентегов И.В. Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги, И.В.Пентегов, В.Н.Сидорев, Автоматическая сварка. - 1989. - № 2. - С.33-36.
6. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И., модель электрической дуги в среде matlab /Simulink, Электротехника и энергетика. 2013. № 2. с.40-46.
7. Савицкий А., Халтоф М., Электричество. Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источниками тока, Электричество, 2016. № 1. с.25-34.
8. Шитиков В.К., Матицкий С.Е. Классификация, регрессия и другие алгоритмы интеллектуального анализа данных с использованием R.2017.351 стр. (Электронная книга).
9. https://ru.wikipedia.org/wiki/Random_forest
10. Хесус Гонсалес, Вэнь Юй, Моделирование нелинейных систем с использованием нейронных сетей LSTM, IFAC-Papersonline 51(13):485-489
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Long_short-term_memory
12. Эк, Дуглас; Шмидхубер, Юрген (2002-08-28). Изучение долгосрочной структуры Блюза. Искусственные нейронные сети — ICANN 2002. Конспекты лекций по информатике. 2415. Шпрингер, Берлин, Гейдельберг. Стр. 284-289.
13. Шмидхубер, Дж.; Герс, Ф.; Эк, Д.; Шмидхубер, Дж.; Герс, Ф. (2002). "Изучение нерегулярных языков: сравнение простых рекуррентных сетей и LSTM". Нейронные Вычисления. 14 (9): 2039–2041.
14. Грейвс, А.; Шмидхубер, Дж. (2005). "Фреймовая классификация фонем с двунаправленным LSTM и другими архитектурами нейронных сетей". Нейронные сети. 18 (5–6): 602–610.
15. Малхотра, Панкадж; Виг, Ловекеш; Шрофф, Гаутам; Агарвал, Пунит (апрель 2015). "Сети долговременной кратковременной памяти для обнаружения аномалий во временных рядах" (PDF). Европейский симпозиум по искусственным нейронным сетям, вычислительному интеллекту и машинному обучению — ESANN 2015.

Шатагин Д.А., Аносов М.С., Ключкова Н.С., Абрамович Е.Д.
Цифровой двойник кибер-физической системы гибридной обработки

*Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/trnio-12-2021-155

Аннотация

В статье описывается метод получения цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой с использованием набора методов машинного обучения. На основе структурно-параметрического подхода определен набор диагностических параметров сигналов силы тока, напряжения и акустической эмиссии. С помощью исследовательского анализа была оценена значимость каждого диагностического параметра. Был разработан комплекс статистических моделей для оценки стабильности процессов 3D-печати с использованием деревьев решений. Определены их оптимальные параметры и эффективность.

Ключевые слова: 3D печать, машинное обучение, аддитивное производство методом дуговой сварки, цифровой двойник, гибридная система, киберфизическая система.