В результате расчетов не одно из условий не было нарушено, значит, деталь признается годной.

Результаты анализа прочности детали позволяют сделать выводы по надежности данной детали и возможному изменению формы детали, которое приведет к экономии материала, либо к увеличению мощности привода, что повысит производительность.

1. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004, - 426 с., ил.
2. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде Solid Works. - М.: ДМК Пресс, 2010, - 784 с., ил. (Серия «Проектирование»).
3. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. - М.: ДМК Пресс, 2015, - 526 с., ил.
4. Шейнблит А.Е. Курсовое проектирование деталей машин. Учеб. пособие. / . Изд. 2-е, перераб. и дополн. - Калининград: Янтар. сказ., 2002 - 454 с.: ил.
5. Шлаев К.И. Моделирование и анализ направляющих качения. /Шлаев К.И., Борискин С.И, Ефанов С.А. // В сборнике: МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА, ТЕХНИКА, ОБРАЗОВАНИЕ материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Рузаевский институт машиностроения. 2017. С. 7-12.
6. Курганов В.В. Моделирование процесса сварки в среде SolidWorks Simulation/ Борискин С.И., Кудав С.П., Чугунов М.В., Кармишин А.М.// Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. статей VIII Международной науч.-практ. конф. г. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2013. С. 34-37
7. Ефанов С.А. Сингулярность при решении задач методом конечных элементов / Ефанов С.А. // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 55-1. С. 31-35.

Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Галкин А.А., Ключкова Н.С.
Разработка цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой
на станке с ЧПУ с использованием методов машинного обучения и численного
моделирования

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

doi: 10.18411/lj-11-2020-57

idsp: ljjournal-11-2020-57

Аннотация

В статье предложена концепция интеллектуальной платформы диагностики процессов 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием цифровых двойников. Рассмотрена методика получения цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой с использованием методов машинного обучения и численного моделирования. На основе структурно-параметрического подхода определен набор диагностических параметров сигналов силы тока, напряжения и акустической эмиссии. С применением разведочного анализа данных (бустинговые модели и случайны лес деревьев решений) произведена оценка значимости каждого диагностического параметра. Разработан комплекс статистических моделей для оценки стабильности процессов 3D-печати с использованием различных методов машинного обучения. Определены их оптимальные параметры и эффективность. Предложена структура БД для хранения телеметрической информации о процессах 3D-печати на станках с ЧПУ. Определены требования к измерительной аппаратуре составу системы датчиков для сбора телеметрической информации.

Ключевые слова: цифровой двойник, машинное обучение, гибридная обработка, 3D-печать, электродуговая наплавка, станки с ЧПУ.

Abstract

The article proposes the concept of an intelligent platform for diagnostics of 3D printing processes by electric arc surfacing on a CNC machine using digital twins. A method for obtaining a digital twin of the 3D printing process by electric arc surfacing using machine learning and numerical simulation methods is considered. On the basis of the structural-parametric approach, a set of diagnostic parameters for the signals of current strength, voltage and acoustic emission was determined. Using exploratory data analysis (boosting models and random forest of decision trees), the significance of each diagnostic parameter was assessed. A complex of statistical models has been developed to assess the stability of 3D printing processes using various machine learning methods. Their optimal parameters and efficiency have been determined. A database structure for storing telemetric information about 3D printing processes on CNC machines is proposed. The requirements for the measuring equipment for the composition of the sensor system for collecting telemetry information have been determined.

Keywords: digital twin, machine learning, hybrid machining, 3D printing, arc surfacing, CNC machines.

Переход промышленности к цифровому производству характеризуется активным освоением новых технологий, к которым относится и 3D-печать. В настоящее время наиболее востребованными технологиями 3D-печати является лазерное сплавление металлических порошков и электродуговая наплавка. При этом наблюдается тенденция интеграции данных видов 3D-печати в металлорежущие станки с ЧПУ. Подобное оборудование способно выращивать заготовки из металлических материалов непосредственно в рабочей зоне с последующей механической обработкой без дополнительных переустановов и специальных приспособлений. Однако существует ряд нерешенных проблем, сдерживающих вывод на рынок станков гибридной обработки, ключевой из которых является отсутствие возможности гарантировать состав, структуру и свойства получаемых заготовок. Как показывают исследования, во многом качество получаемых заготовок определяется динамическим состоянием системы “источник питания - электрическая дуга - материал” обуславливающей процессы плавления, тепломассопереноса и кристаллизации металла. Поэтому необходима разработка новых методов и систем диагностики динамической устойчивости процессов 3D-печати на станках с ЧПУ, способных формировать “цифровой” паспорт металла в процессе изготовления. Разработка таких систем требует решения целого комплекса инженерных и научных задач, а именно: выявить набор диагностических параметров динамического состояния процесса 3D-печати, определить требования к системе сенсоров, разработать структуру хранилища диагностических данных, предложить математическую модель процесса электродуговой наплавки (“цифровой двойник”), создать методику диагностики на основе собираемой информации.

В рамках исследования решение обозначенных задач осуществлялось на основе подходов численного моделирования в среде Matlab Simulink, экспериментальных исследований на основе разработанного стенда гибридной обработки и статистического анализа данных с использованием методов машинного обучения в среде разработки R Studio.

В состав стенда входит станок с ЧПУ портального типа, система электродуговой наплавки MIG 200, 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, пирометр, для контроля температуры в зоне печати, и ПК для сбора и обработки данных. Сбор данных в процессе экспериментальных исследований осуществлялся в рамках эмулятора сети промышленного интернета вещей и сервиса

облачного хранения и обработки данных Microsoft Azure. Такой подход позволил в последствии реализовать полноценный статистический анализ экспериментальных данных с постоянно растущей размерностью. В ходе эксперимента, на станке осуществлялась печать металлических образцов из сварочной проволоки Св 08-Г2С с переносом электродного материала коротким замыканием. В качестве регистрируемых параметров, принимались фактические значения силы тока, напряжение и сигналы акустической эмиссии в виде временных рядов.

Рис. 1- Схема экспериментального стенда по изучению процессов электродуговой наплавки на станке с ЧПУ:

1 – порталный трехкоординатный станок с ЧПУ; 2 – широкополосный датчик АЭ; 3 – ПК с системой беспроводного доступа к облачному сервису; 4 – датчики силы тока и напряжения; 5 – АЦП/ЦАП; 6 – система ЧПУ; 7 – сварочный полуавтомат; 8 – облачный сервис; 9 – баллоны с защитным газом

В рамках эксперимента рассматривались различные режимы 3D-печати, после чего происходила предварительная обработка сигналов с системы сенсоров с использованием полосовых цифровых фильтров и Wavelet анализа. Так сигналы силы тока и напряжения рассматривались в диапазоне частот от 1Гц до 1кГц, а сигналы акустической эмиссии от 50 кГц до 100 кГц. Wavelet-фильтрация позволила минимизировать влияние шумовой составляющей в сигналах ВАЭ и осуществить декомпозицию сигнала на периодическую и хаотическую составляющие на основе энтропийных показателей.

Учитывая специфику динамики электрической дуги при переносе материала короткими замыканиями, фактическое изменение значений силы тока, напряжения и акустической эмиссии можно рассматривать как импульсный процесс. Такой подход позволяет применить общепринятые параметры импульсов для оценки динамической устойчивости процесса 3D-печати. На основе специально разработанного ПО осуществлялась регистрация следующих параметров импульсов силы тока и напряжения: перерегулирование нижнего значения (Overshoot_Pre), недорегулирование нижнего значения (Undershoot_Pre), время нарастания импульса (Transition_Duration), период импульса (Period), длительность импульса (Puls_Duration), скважность (Duty_Cycle), среднеквадратическое значение за период (Cycle_RMS) и энергия импульса (Energy), максимальное значение амплитуды (Amplitude_max), среднее значение амплитуды (Amplitude_min). Каждому импульсу дополнительно присваивался статус “стабильный” или “нестабильный” на основе наблюдений за процессом 3D-печати на различных режимах. Данные параметры также применялись и для сигнала АЭ для каждой из фаз электрической дуги.

Рис. 2 - Стадии переноса материала и соответствующие фазы изменения силы тока и напряжения, а также сигнала АЭ.

На основе полученных результатов была разработана структура БД для хранения информации о процессах 3D-печати. К основным структурным элементам БД относятся: таблица параметров импульсов силы тока (Imp_Curr_Param), таблица параметров импульсов напряжения (Imp_Volt_Param), таблица параметров сигнала акустической эмиссии (Acoustic_signal_param), таблица параметров фазы короткого замыкания (Short_Circuit_Phase), таблица параметров фазы розжига дуги (Start_Wire_Arc_Phase), таблица параметров фазы потери устойчивости дуги (Loss_Stability_Wire_Arc_Phase), таблица параметров измерительного оборудования (Measurement_tool), таблица параметров режимов наплавки (3DPrint_modes), таблица оператора (Operator), таблица параметров операции 3D-печати (3DPrint_Operation), таблица параметров промышленного оборудования (3DPrint_tool).

После заполнения БД был произведен разведочный анализ данных [1], для выявления зависимостей и значимости каждого из параметров при оценке стабильности процесса 3D-печати и построения математических моделей. На рисунке 3 представлены диаграммы распределения плотности некоторых параметров импульсов. При этом показаны плотности распределения параметра как для стабильных импульсов Stab - Yes, так и для нестабильных Stab - No.

Рис. 3 - Распределение параметров стабильных и нестабильных импульсов тока и напряжения:
а) - перерегулирование импульса напряжения; б) - среднеквадратичное значение импульса напряжения;
в) - недорегулирование импульса напряжения; г) - среднеквадратичное значение импульса тока

Связь между параметрами импульсов оценивалась на основе корреляционного анализа. При этом установлено, что параметры: энергия импульса, период импульса и длительность импульса имеют ярко выраженную корреляцию. Поэтому при построении моделей процесса 3D-печати возможно исключение некоторых из них, для сокращения размерности данных.

Оценка важности каждого из параметров происходила на основе метода “Случайного леса” [2], сущность которого заключается в построении множества моделей деревьев решений с различным сочетанием входных элементов. В работе было построено порядка 5000 деревьев решений с различной комбинацией входных элементов и были выявлены наиболее важные, исключение которых из модели приводило к резкому снижению точности (рис. 4). Из рисунка 4 видно, что наиболее важными параметрами являются среднеквадратичное значение импульса тока за период, перерегулирование напряжения и среднеквадратичное значение импульса напряжения. Граница между данными параметрами также отчетливо прослеживается и на диаграммах распределения (рис.3). Остальные параметры процесса 3D-печати оказывают наименьшее влияние на точность модели, поэтому их можно исключить.

Рис. 4 - Оценка значимости параметров импульсов силы тока и напряжения

По результатам разведочного анализа данных, был получен комплекс моделей, «цифровых двойников», для оценки устойчивости процесса 3D-печати на станках с ЧПУ. Для этого были использованы различные методы машинного обучения, а именно: деревья решений [3] (rpart), адаптивные бустинговые модели [4] (ada), машина опорных векторов [5] (svm), случайный лес деревьев решений (rf), обобщенная линейная модель [6] (gla) и искусственные нейронные сети (nnet). Обучение моделей и оценка их адекватности происходила на обучающей выборке, состоящей из: 70% тренировочных данных, 15% контрольных данных и 15% тестовых. По результатам обучения была сформирована таблица (табл. 1) проверки моделей, в которой указывался процент правильно выбранных классов состояния процента 3D -печати.

Таблица 1.

Процент правильно выбранных классов состояния процента 3D –печати по результатам обучения в зависимости от метода

	rpart	ada	svm	rf	gla	nnet
%	87	94	97	98	94	98

Анализ таблицы 1 показал высокую эффективность каждого из метода. Наиболее удобно интерпретируемой моделью является дерево решений [3] (рис. 5). Из рисунка 5 видно, что уже на основе только одного критерия – перерегулирование по напряжению (Overshoot_Post_Volt) возможна уже достаточно точная классификация процесса.

Рис. 5 – Модель классификации динамического состояния процесса 3D-печати полученная на основе метода деревьев решений

Использование подобных цифровых двойников процессов полученных исключительно на статистических данных может показывать хороший результат только в рамках уже изученных режимов наплавки и может с высокой точностью применяться в отработанных технологических процессах. Как правило в реальном серийном производстве постоянные режимы обработки регламентированы на конкретную номенклатуру детали и используются в течении длительного времени. Однако, для реализации полноценной системы диагностики процесса 3D-печати необходимо иметь сведения о параметрах тока и напряжения для различных комбинаций режимов электродуговой наплавки. Это особенно важно при единичном или мелкосерийном производстве с широкой номенклатурой изделий. Для этого потребуются проведения большого количества экспериментальных исследований, что является весьма ресурсоемким. Поэтому в данной работе система 3D - печати рассматривалась в виде “серого ящика”. Это позволило проводить оценку стабильности процесса наплавки, еще до набора необходимых статистических данных для создания статистической модели. Для реализации такого подхода была разработана динамическая модель системы “источник питания - электрическая дуга” в среде имитационного моделирования Matlab Simulink. Электрическая дуга рассматривалась в качестве нелинейной нагрузки в соответствии с общей математической моделью динамической дуги (ММДД) [8,9,10,11]:

$$\theta \frac{di_{\theta}}{dt} + i_{\theta}^2 = i^2 \quad (1)$$

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

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

$$U(i_{\theta}) = U_0 \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^n \quad (2)$$

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. В некотором приближении, такая ВАХ может быть справедлива и для полуавтоматической сварки в среде CO_2 при значениях силы тока порядка 120 А. Исходя из этих соображений, показатель степени ВАХ обращается в ноль, а зависимость (2) приобретает вид:

$$U(i_\theta) = U_0 \operatorname{sgn}(i_\theta) \quad (3)$$

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:

$$\theta \frac{dg^2}{dt} + g^2 = \frac{i^2}{U_0^2} \quad (4)$$

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. Для реализации модели был использован стандартный блок библиотеки Matlab Simulink – Cassie arc model. 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 6 показан пример результатов моделирования переходного процесса в напряжении. Использование различных комбинаций режимов наплавки в ходе моделирования, позволило получить семейство эталонных переходных процессов и их параметров, в частности: амплитуда, перерегулирование, недорегулирование и время нарастания.

Рис. 6 – Результаты моделирования переходного процесса при коротком замыкании дугового промежутка

Все значения полученных параметров были записаны в разработанную БД. Для оценки стабильности процесса 3D-печати по моделируемым данным был применен расчет расстояния между вектором фактического состояния переходного процесса в дуге и эталонным. Расчет расстояния между векторами происходил на основе геометрического представления четырех-мерного Евклидова пространства состояния динамической системы для каждого конкретного режима наплавки:

$$d(x_i x_j) = ||x_i - x_j|| = [\sum_{k=1}^m (x_i - x_{jk})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

где x_{ik} и x_{jk} – k -е элементы векторов x_i и x_j соответственно.

Полученное расстояние представляет собой величину отклонения реального процесса от эталонного. В реальных производственных условиях, допустимая величина отклонения может задаваться пользователем, и определяется, в процентном соотношении от длины вектора смоделированного состояния по формуле:

$$\delta = |\bar{x}| \cdot \frac{\partial}{100} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \cdot \frac{\partial}{100} \quad (6)$$

где δ – допустимая величина расстояния между векторами, $|\bar{x}|$ – длина вектора смоделированного состояния, ∂ – значение допустимой величины отклонения в процентах, задаваемой пользователем, x_1, x_2, x_n – расстояние между координатами вектора смоделированного состояния и фактического. Таким образом, с использованием математической модели электрической дуги, возможна приближенная оценка стабильности процесса 3D-печати до формирования обучающих выборок и создания уточняющих статистических моделей.

Выводы

1. Предложена концепция интеллектуальной диагностики процессов 3D-печати электродуговой наплавкой на станках с ЧПУ. В рамках концепции разработана методика по оценки стабильности динамической системы «источник питания – электрическая дуга» на основе классификации сигналов силы тока, напряжения и акустической эмиссии, а также результатов численного моделирования с использованием модели дуги Касси.

2. Предложена структура БД для хранения телеметрической информации о процессах 3D-печати на станках с ЧПУ. Определены требования к измерительной аппаратуре составу системы датчиков для сбора телеметрической информации.

3. На основе структурно-параметрического подхода определен набор диагностических параметров сигналов силы тока, напряжения и акустической эмиссии. С использованием методов разведочного анализа данных (бустинговые модели и случайны лес деревьев решений) произведена оценка значимости каждого диагностического параметра.

4. Разработан комплекс статистических моделей для оценки стабильности процессов 3D-печати с использованием различных методов машинного обучения. Определены их оптимальные параметры и эффективность.

1. Шитиков В. К., Мاستицкий С. Э. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. 2017. 351 с. (Электронная книга).
2. https://ru.wikipedia.org/wiki/Random_forest (дата обращения 05.10.20)
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree_learning (дата обращения 15.12.18)
4. <https://ru.wikipedia.org/wiki/AdaBoost> (дата обращения 05.10.20)
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Support_vector_machine (дата обращения 05.10.20)
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_regression (дата обращения 05.10.20)
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Neural_network (дата обращения 05.10.20)
8. Пентегов И. В. Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец // Автоматическая сварка. - 1989. - № 2. - С. 33-36.
9. Модель электрической дуги в MATLAB / SIMULINK Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. Электротехника и электроэнергетика. 2013. № 2. С. 40- 46.
10. Моделирование сварочной и печной электрической дуги Лисиенко В.Г., Лавров Н.Г., Ближник М.Г. В сборнике: Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию основания кафедры ТИМ, УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ». Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2015. С. 378-386.
11. Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источниками тока / Савицки А., Хальтоф М. Электричество. 2016. № 1. С. 25-34.