

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(11) 050181

(13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2025.06.18

(21) Номер заявки
202493112

(22) Дата подачи заявки
2024.12.25

(51) Int. Cl. B33Y 10/00 (2015.01)
B23K 9/10 (2006.01)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ ПУТЕМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ
ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКОЙ
ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА

(43) 2025.06.11

(96) 2024000330 (RU) 2024.12.25

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
"НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА" (НГТУ) (RU)

(56) RU-C1-2831634
RU-A-2015148796
CN-A-109967907
CN-A-113172305
WO-A1-2017177454

(72) Изобретатель:
Шатагин Дмитрий Александрович,
Манцеров Сергей Александрович,
Аносов Максим Сергеевич, Клочкова
Наталья Сергеевна (RU)

(74) Представитель:
Куркин А.А. (RU)

(57) Способ относится к области аддитивных технологий, его использование может распространяться на другие области формообразования металлов и сплавов. Данный способ позволяет в автоматическом режиме осуществлять идентификацию системы 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием экспериментального набора данных и разработанной рекуррентной нейросетевой модели. Параллельно с процессом наплавки осуществляют сбор телеметрических данных изменения значений силы тока, напряжения электрической дуги и сигнала акустической эмиссии, на основе которых формируют энерго-акустический сигнал, который является результатом суперпозиции сигналов изменения мощности электродуговой наплавки и огибающей сигнала акустической эмиссии, и реконструируют фазовый портрет динамической системы с последующим расчетом критериев нелинейной динамики, на основе чего классифицируют данные на устойчивые и неустойчивые, затем диагностируют текущее состояние процесса 3D-печати электродуговой наплавкой и прогнозируют его в последующие 0,1 с с помощью рекуррентной нейросетевой модели. Способ позволяет производить диагностику текущего состояния процесса электродугового выращивания и прогнозировать будущее, что поможет предотвратить получение заготовок с дефектами в виде пор, зашлакованности, непроплавления и т.д.

B1

050181

050181

B1

Способ относится к области аддитивных технологий, его использование может распространяться на другие области формообразования металлов и сплавов. Данный способ позволяет в автоматическом режиме осуществлять идентификацию системы 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием экспериментального набора данных и разработанной рекуррентной нейросетевой модели. Диагностика процесса электродуговой наплавкой помогает определить устойчивость нелинейной динамической системы "источник питания - электрическая дуга - сварочная ванна - материал", что влияет на условия каплеобразования и переноса электродного материала, зоны кристаллизации и химические превращения в материале, а также образования различных дефектов сварки.

Известен "Способ диагностики формообразования при сварке и устройство для его осуществления" (RU 2127177, МПК В23К 9/10, публ. 10.03.1999 г.), который обеспечивает расширенные возможности автоматических подстройки и самодиагностики; компенсационное амплитудное слежение с управлением рефлекторной оптической и электронной составляющими чувствительности; спектральное фильтрационное обнаружение недопустимых структурных составляющих искр, износа неплавящегося электрода, учета неизвестных изменяющихся излучательной способности и потерь поглощения пропускающей среды; дифференцирующее обнаружение и прогноз недопустимых металлургических дефектов; корреляционный термограммный контроль твердости. При этом представляются пространственно-амплитудные (экстремумы, градиенты), пространственно-геометрические (центральные области, площади, объемы, расстояния, связность, разветвленность, изменения углов, траекторий и конфигураций, ориентацию, конфигурации) и статистические (математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение или центр, площадь, средний радиус совокупности условно точечных объектов) информативные данные обнаружения и распознавания характеристик формообразования. Данный способ заключается в том, что измеряют излучение теплового следа перед сварочным инструментом в инфракрасном оптическом диапазоне и преобразуют его в электрический сигнал преобразователем.

Недостатком данного способа является отсутствие возможности в автоматическом режиме производить диагностику текущего состояния процесса электродугового выращивания.

Также известен "Способ и устройство диагностики и управления качеством лазерной сварки" (RU 2258589, МПК В23К 26/20, В23К 26/42, публ. 20.08.2005 г.), заключающийся в том, что производят измерение пространственно-временных сигналов инфракрасного излучения тепловых волн проплавления следов воздействий сварочного инструмента в визируемых областях на поверхности свариваемых деталей, преобразование временных, пространственных изменений амплитуд сигналов в градиентно-экстремальные сигналы путем моделируемых дифференциальным уравнением теплопроводности накопления и размытия, преобразование инфракрасного излучения в информативные электрические сигналы, определение относительных отклонений сварочного инструмента от стыка между свариваемыми деталями и/или от угла между деталями и осью сварочного инструмента, определение наличия процесса сварки при равенстве или превышении первого порогового значения, определение непровара при равенстве или снижении относительно второго порогового значения, определение перегрева при равенстве или превышении третьего порогового значения для суммарных сигналов со всех термочувствительных элементов термодатчика, определение выброса расплавленного материала при равенстве или превышении пороговых значений выбросов для временной производной суммарного сигнала, определение навигационных характеристик управления движением путем сравнения соответствующих областей визирования стыка для прихватки с четвертым, для закрытого края шва, с пятым, для открытого края, с нулевыми пороговыми значениями соответственно заданной технологии сварки.

Недостатком данного способа является невозможность применения способа к 3D-печати электродуговой наплавкой.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому способу является "Способ 3D-печати на оборудовании с ЧПУ с интеллектуальной оптимизацией режимов" (RU 2696121, МПК В33У 10/00, В22Ф 3/00, публ. 31.07.2019 г.). Способ включает формирование заготовки электродуговой наплавкой в среде защитных газов из слоев, состоящих из соприкасающихся друг с другом наплавленных валиков металла, и выполнение чистовой механической обработки сформированной заготовки. Особенностью данной системы является использование нейронной сети, которая выполняется с возможностью автономного принятия решения об оптимизации режимов наплавки и формирования команд на изменение параметров оборудования с ЧПУ.

К числу недостатков известного способа относится невозможность производить диагностику текущего состояния процесса электродугового выращивания и прогнозировать будущее.

Задачей, на решение которой направлено настоящее изобретение, является разработка способа, повышающего качество состава, структуры и свойств изделий, получаемых методом аддитивного электродугового выращивания.

Технический результат достигается благодаря тому, что предлагаемый способ изготовления изделия путем трехмерной печати электродуговой наплавкой на оборудовании с ЧПУ также, как и способ-прототип, включает формирование заготовки в среде защитных газов с последующим выполнением чистовой обработки сформированной заготовки. Новым является то, что параллельно с процессом наплавки осуществляют сбор телеметрических данных изменения значений силы тока, напряжения электрической

дуги и сигнала акустической эмиссии, на основе которых формируют энергоакустический сигнал, который является результатом суперпозиции сигналов изменения мощности электродуговой наплавки и огибающей сигнала акустической эмиссии, и реконструируют фазовый портрет динамической системы с последующим расчетом критериев нелинейной динамики, на основе чего классифицируют данные на устойчивые и неустойчивые, затем диагностируют текущее состояние процесса 3D-печати электродуговой наплавкой и прогнозируют его в последующие 0,1 секунд с помощью рекуррентной нейросетевой модели.

Изобретение поясняется следующими фигурами.

На фиг. 1 представлена схема установки для 3D-печати электродуговой наплавкой с синхронной регистрацией значений напряжения, силы тока электрической дуги и сигнала АЭ.

На фиг. 2 представлены: а) осциллограмма энергоакустического сигнала; б) спектрограмма энергоакустического сигнала; в) проекции фазового портрета при устойчивом процессе 3D-печати.

На фиг. 3 представлена карта режимов напряжения и силы тока (U и I) с разметкой на устойчивые и неустойчивые при постоянной подаче (S).

На фиг. 4 представлены архитектура и принцип работы глубокой двунаправленной рекуррентной нейросетевой модели с двухмерным входом (2D BiLSTM) классификации динамической устойчивости процесса 3D-печати.

Заявленный способ реализуется на установке для 3D-печати, которая состоит из портального трехкоординатного станка с ЧПУ 1, широкополосного датчика акустической эмиссии (АЭ) 2, персонального компьютера (ПК) 3 с системой беспроводного доступа к облачному сервису, датчиков силы тока и напряжения электрической дуги 4, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) 5, шины сбора данных 6, сварочного полуавтомата 7, баллонов с защитным газом 8, сварочного стола 9 с вытяжным шкафом.

Принцип работы заявленного способа заключается в следующем: портальный трехкоординатный станок с ЧПУ 1, получая сигнал от сварочного полуавтомата 7, начинает наплавку заготовки на сварочном столе 9 в среде защитных газов, которые поступают из баллонов с защитных газов 8. Параллельно с процессом наплавки осуществляется сбор телеметрических данных изменения значений силы тока, напряжения электрической дуги и сигнала акустической эмиссии. Для сбора сигналов с датчиков силы тока и напряжения 4 и датчика АЭ 2 используется АЦП 5. Момент начала и завершения сбора информации определяется по порогу изменения постоянной составляющей силы тока $I_{const} > 100$ А. Все данные поступают на шину сбора данных 6 и в ПК 3. Полученные данные в виде временных рядов сигналов для каждого слоя сохраняются в виде CSV-файла. Затем полученные временные ряды сигналов обрезаются по 600000 отсчетов (3 с) с начала процесса наплавки и с конца для исключения влияния переходных процессов розжига и гашения электрической дуги. После происходит их статистическая обработка, формирование энергоакустического сигнала (результат суперпозиции сигналов изменения мощности электродуговой наплавки и огибающей сигнала акустической эмиссии) (фиг. 2а, б) и реконструкция фазового портрета динамической системы (фиг. 2в) с последующим расчетом критериев нелинейной динамики, таких как фрактальная размерность, старший показатель Ляпунова и информационная энтропия. Реконструкция аттрактора осуществляется на основе теоремы Такенса. Полученные телеметрические параметры и временные ряды энергоакустического сигнала записываются в разработанную ранее БД (свидетельство о государственной регистрации № 2021620673). После этого осуществляется разметка данных. На первом этапе происходит автоматическая классификация данных по значениям фрактальной размерности энергоакустического портрета (D_f). Значения с $D_f > 2,5$ размечаются как предположительно неустойчивые, а с $D_f < 2,5$ устойчивые. Затем происходит разметка данных с использованием экспертной оценки. На основе визуального контроля происходит присвоение классов наплавленных слоев с использованием специального диалогового окна. По завершению данного этапа осуществляется сравнение экспертной оценки и результатов автоматической классификации по показателю D_f . Слои, где результаты оценок разошлись, считаются претендентами на дополнительное исследование. В противном случае экспертная оценка считается приоритетной. Таким образом, формируется набор карт для каждого значения подачи в координатах "сила тока - напряжение" с обозначением области устойчивого и неустойчивого переноса материала (фиг. 3). После разметки данных происходит обучение нейросетевой модели оценки динамической устойчивости. Для этой цели была выбрана архитектура глубокой двунаправленной рекуррентной нейросетевой модели с двухмерным входом (2D BiLSTM). На основе рассчитанных значений фрактальной размерности энергоакустического портрета системы и спектральной энтропии за 0,2 с наблюдений, модель позволяет прогнозировать устойчивость динамической системы в последующие 0,1 с процесса. Входом модели является двумерный массив (2D) данных [2:1000] со значениями фрактальной размерности и спектральной энтропии рассчитанных для временного ряда энергоакустического сигнала с использованием 1000 скользящих окон длиной 0,1 с (20000 отсчетов) и сдвигом в 20 отсчетов (фиг. 4). Выходом модели является значение класса 1 - "устойчиво" или 0 - "неустойчиво". Таким образом, модель решает задачу бинарной классификации по принципу "последовательность - значение" (sequence to end). Основными структурными элементами модели являются: блок расчета значений фрактальной размерности и спектральной энтропии, блок формирования входной последовательности, блок нормирования данных, двунаправленный рекуррентный слой (BiLSTM, размерность выхода = 1000), полносвязный

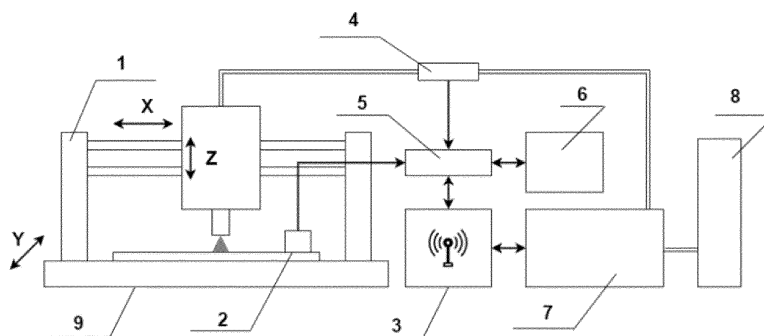
слой (Fully Connected Layer), SoftMax-слой и слой бинарной классификации. Используемые параметры при обучении модели: количество эпох 'MaxEpochs' = 100, размер минибатча 'MiniBatchSize' = 150, начальная скорость обучения 'InitialLearnRate' = 0.01, GradientThreshold = 1. Разбиение обучающей выборки осуществлялось как: Train = 70%, Test = 15%, Validation = 15%. Точность обучения окончательной модели составляет 91%.

Данный способ включает в себя постоянный анализ точности работы модели. Анализ заключается в расчете ошибки прогноза значений фрактальной размерности энергоакустического портрета системы и спектральной энтропии с последующим сравнением с установленным пороговым значением абсолютной величины и скорости роста ошибки. В случае превышения пороговых значений происходит оповещение с рекомендацией выполнения повторной идентификации системы в области данных режимов.

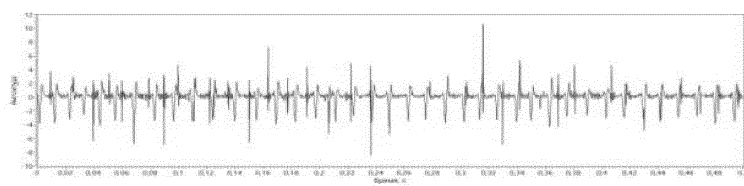
Таким образом, данный способ позволяет производить диагностику текущего состояния процесса электродугового выращивания и прогнозировать будущее, что поможет предотвратить получение заготовок с дефектами в виде пор, зашлакованности, непроплавления и т.д.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

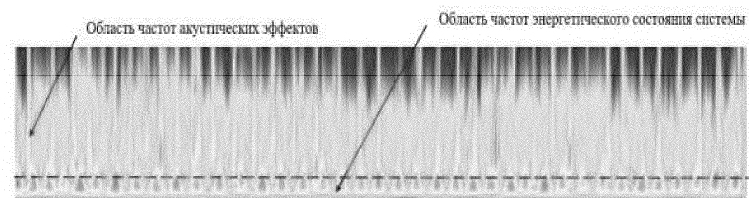
Способ изготовления изделия путем трехмерной печати электродуговой наплавкой на оборудовании с ЧПУ, включающий формирование заготовки в среде защитных газов с последующим выполнением чистовой обработки сформированной заготовки, отличающийся тем, что параллельно с процессом наплавки осуществляют сбор телеметрических данных изменения значений силы тока, напряжения электрической дуги и сигнала акустической эмиссии, на основе которых формируют энергоакустический сигнал, который является результатом суперпозиции сигналов изменения мощности электродуговой наплавки и огибающей сигнала акустической эмиссии, и реконструируют фазовый портрет динамической системы с последующим расчетом критериев нелинейной динамики, на основе чего классифицируют данные на устойчивые и неустойчивые, затем диагностируют текущее состояние процесса 3D-печати электродуговой наплавкой и прогнозируют его в последующие 0,1 с с помощью рекуррентной нейросетевой модели.



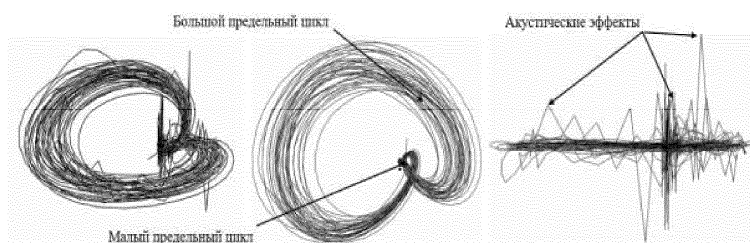
Фиг. 1



а)

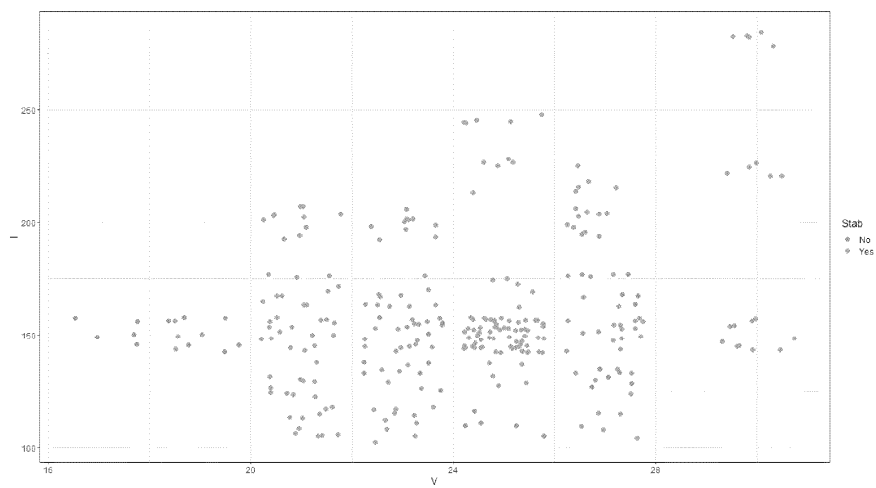


б)

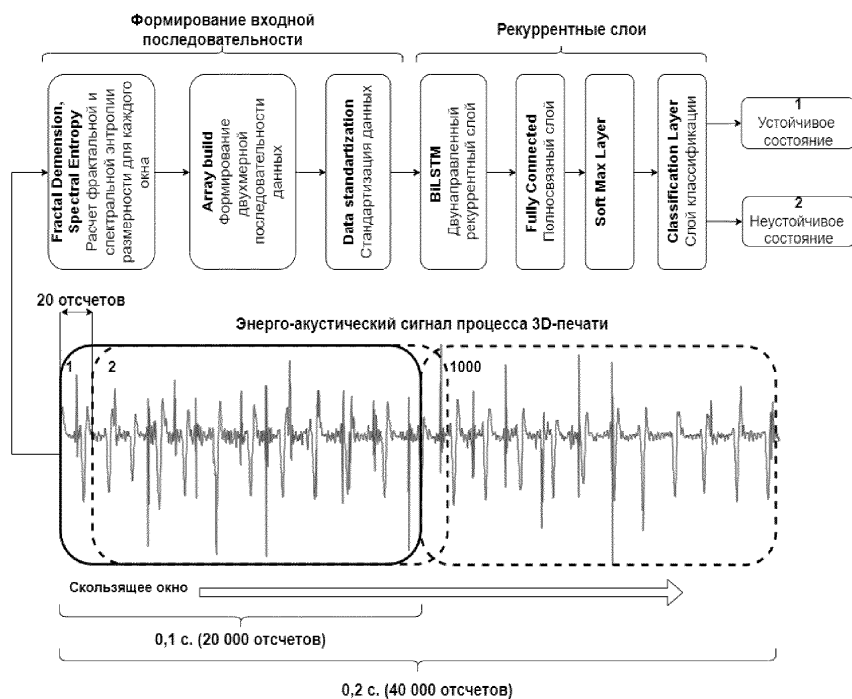


в)

Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2