



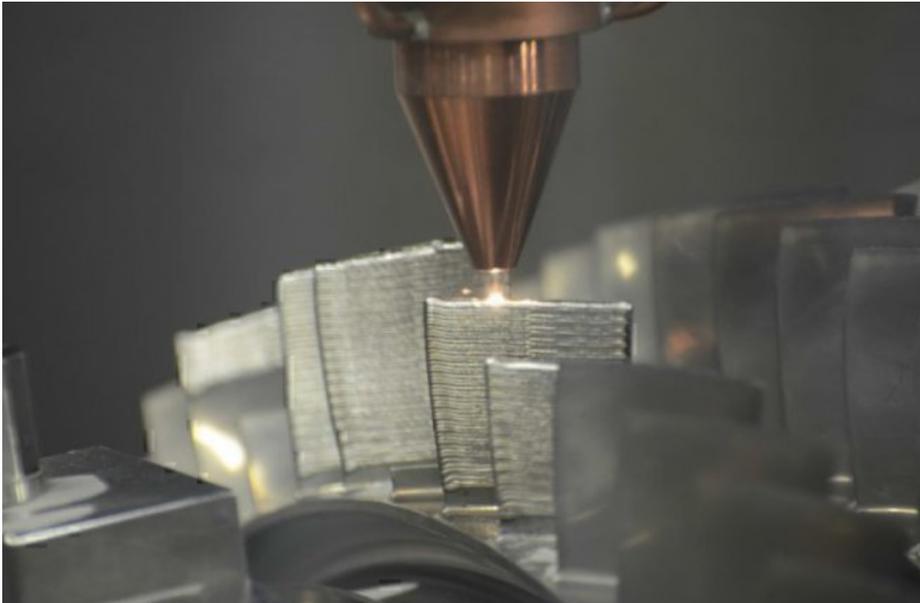
Управление технологическими параметрами прямого лазерного выращивания тонких стенок с использованием нейронной сети

М.И. Банников¹, П. С. Родин¹, А. В. Дубров¹

Отделение "Институт проблем лазерных и информационных технологий - Шатура"
Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»¹

E-mail: mi.bannikov@laser.ru

Технология лазерного нанесения металла



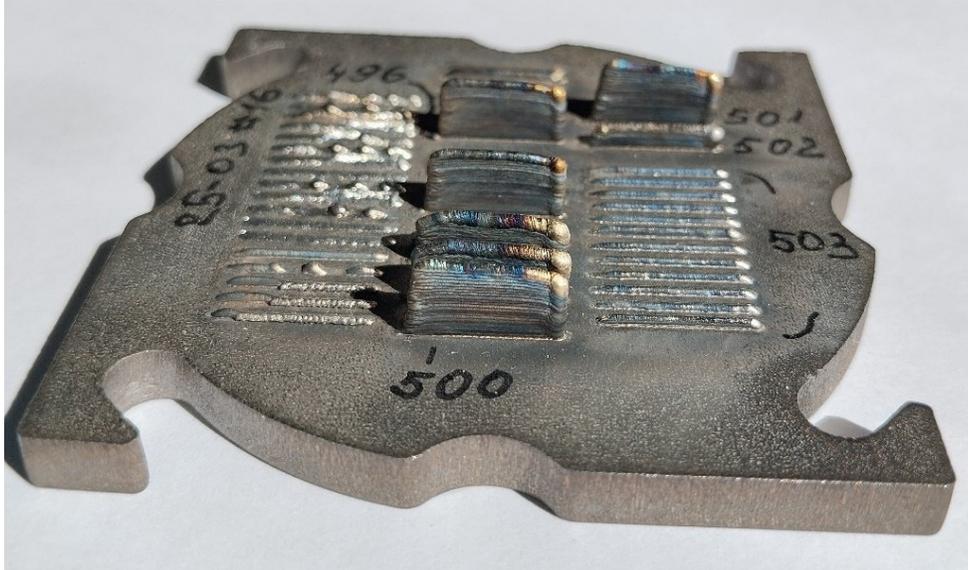
Источник: Rolls Royce engine maintenance with snakes and beetles (2017)

"3D-печать металлом": Мы создаем деталь послойно наращивая ее.

Три основных управляемых параметра:

- Мощность лазера — «сколько тепла» мы даем.
- Скорость сканирования — «как быстро» движется лазер.
- Скорость подачи — «сколько материала» мы подаем.
Нужно точно согласовать с нагревом и движением.

Проблема и цель исследования



Пример выращенных стенок

- Проблема: При лазерном нанесении тонких стенок из нержавеющей стали геометрия слоев нестабильна. На первых слоях происходит поглощение тепла подложкой, на верхних ситуация отличается.
- Жестко заданные параметры (мощность, скорость) не обеспечивают постоянного качества по всей высоте изделия.
- Цель: Разработать адаптивную модель, которая в реальном времени подбирает оптимальные параметры для каждого нового слоя, учитывая историю процесса.

Предлагаемый метод: нейронная сеть + история процесса

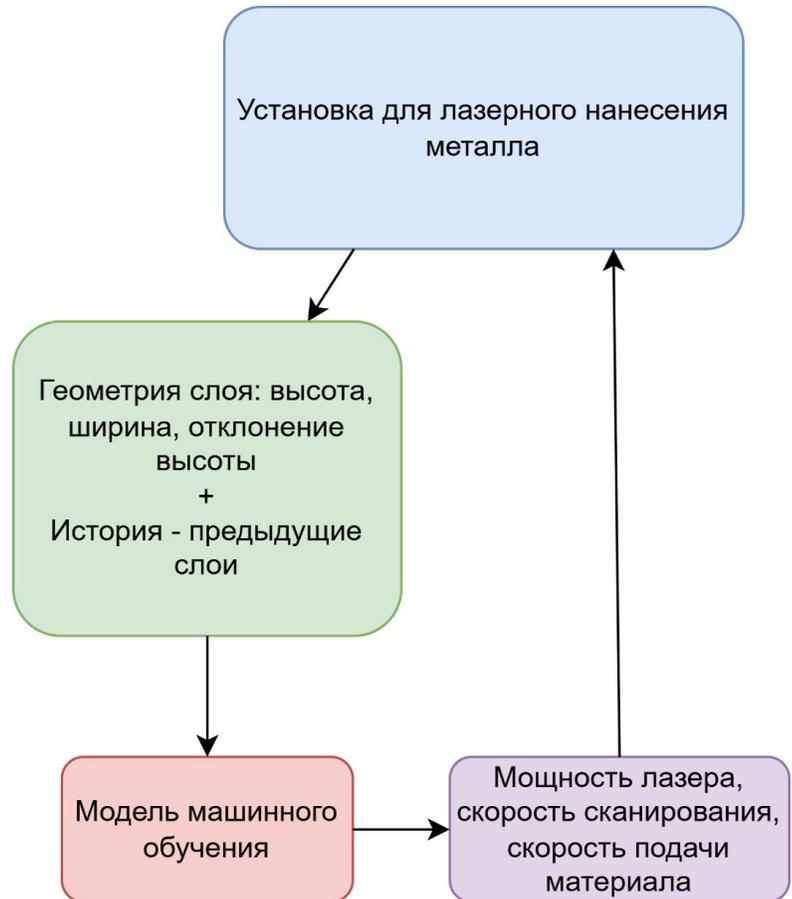
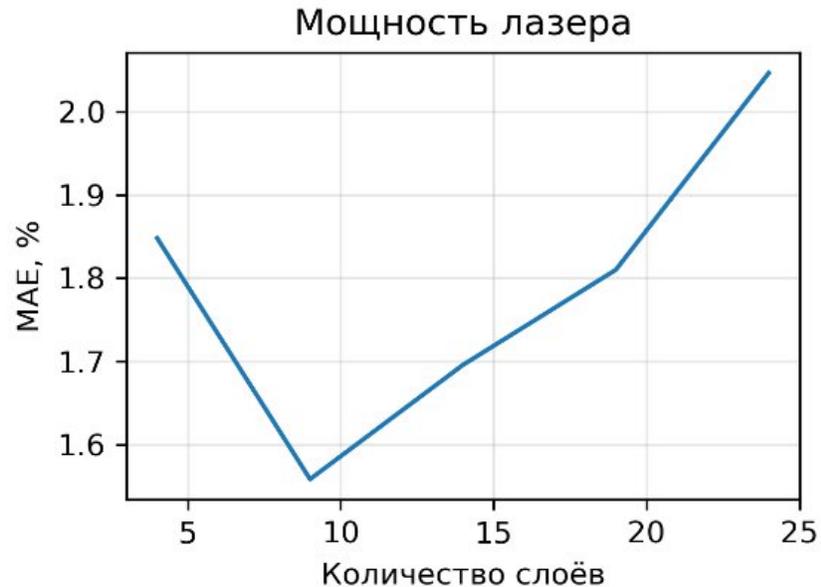


Схема интеллектуального контроля процесса выращивания тонких стенок

- Ключевая идея: Учесть историю. Для прогноза параметров слоя мы используем данные о предыдущих нанесённых слоях.
- Инструмент: Рекуррентная нейронная сеть с LSTM-блоками.
- Данные: 37 выращенных стенок, до 25 слоев в каждой.
- На вход модели подаются: высота, ширина, отклонение высоты.
- На выходе: мощность лазера, скорость сканирования, скорость подачи.

Ключевые результаты



Ошибка предсказания мощности лазера в зависимости от использованного количества слоёв в истории при обучении

- Оптимальная история: 9 слоев для точного прогноза.
- Высокая точность: Средняя ошибка на валидационных данных:
 - Мощность лазера: 1.5 %
 - Скорость сканирования: 0.072 мм/с
 - Скорость подачи: 0.064 мм/с
- Точность максимальна, начиная с 10-го слоя.
- Модель существенно превосходит методы, не учитывающие динамику процесса (градиентный бустинг, полносвязные сети).

Выводы и перспективы

- Вывод: применение машинного обучения, в частности рекуррентной нейронной сети с блоком LSTM с учетом истории слоев — эффективный инструмент для адаптивного управления лазерным нанесением металла.
- Перспективы:
 - Интеграция данных с датчиков температуры и машинного зрения в реальном времени.
 - Тестирование на широком спектре материалов.
 - Внедрение в систему с обратной связью для полной автоматизации.

Спасибо за внимание!