

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ МЕТАЛЛА В ВАКУУМЕ

А.А. САВЛУК, Д.А. САВЛУК, Г.В. ЛЫСАК, И.А. ЛЫСАК

Томский политехнический университет

E-mail: aas293@tpu.ru

В последние три десятилетия происходит становление и активное развитие послойных аддитивных технологий (АТ). АТ – это совокупность методик (технологий), позволяющих создавать трехмерные изделия в едином технологическом процессе по данным компьютерных моделей. Интенсивность их развития не имеет аналогов, при этом внедрение их промышленностью называют «Третьей индустриальной революцией» [1]. Эти технологии принципиально изменили этапы проектирования и конструирования изделий, превратив их в процессы непрерывного создания изделий. Модели создаются путем наслаивания вещества, и при малой толщине слоя они очень близки к своему прототипу. Во многих отраслях, например, для ряда изделий в ракетно-космической отрасли, альтернативы аддитивным технологиям уже сегодня нет. Сейчас АТ стали мощным инструментом в ракетостроении. Разрабатываются инновационные процессы, позволяющие создавать модели со все более высокой точностью, скоростью, с уникальными свойствами и с новыми экономическими преимуществами.

На сегодняшний день аддитивные технологии занимают особое место среди научных исследований. Это обусловлено следующими факторами, которые доступны для 3D-печати:

- технологичность: широкий спектр материалов для 3D-печати;
- материалоемкость: практически полное отсутствие механической обработки со съёмом материала в связи с «наращиванием» изделий;
- экономичность: снижение затрат на материалы;
- экологичность: отсутствие твёрдых отходов производства (стружка, опилки металла).

В связи с активными проведениями научных исследований в области аддитивных технологий всё больше различных видов технологий аддитивного производства становится доступным из года в год.

Наиболее известная и изученная технология – порошковый метод с источниками нагрева в виде лазера или электронного пучка. Технология актуальна для изготовления мелких деталей, требующих высокой точности.

Что касается крупногабаритных деталей, то наиболее перспективными являются проволочные методы прямого осаждения материалов, такие как электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) [2].

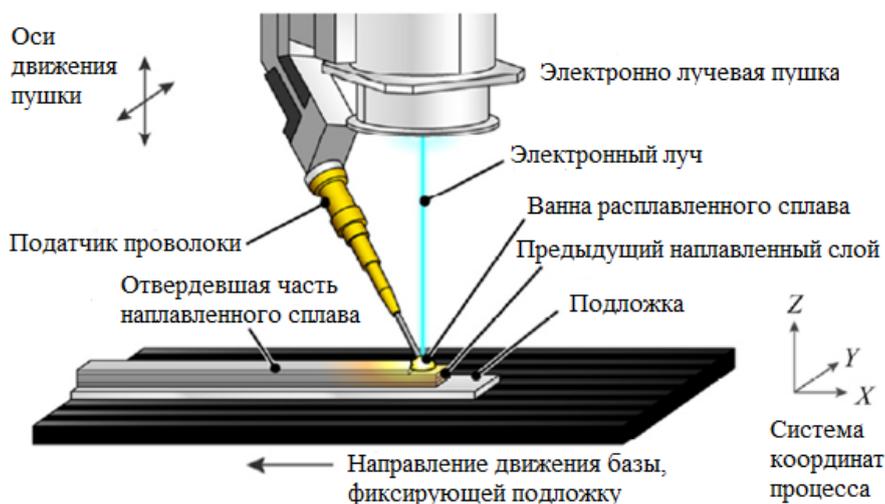


Рисунок 1. Схема формообразования методом ЭЛАП

В статье [3] ЭЛАП описывается как метод, который относится к подгруппе технологий прямого энергетического осаждения. ЭЛАП включает в себя процессы плавления и затвердевания металлической проволоки с использованием источника электронного луча для формирования геометрии детали послойным способом. Коллегами [3] разработана трехмерная переходная полностью связанная термомеханическая модель для ЭЛАП с использованием программного обеспечения ABAQUS™ для исследования и планирования методологии и процесса осаждения титанового сплава. Данная модель была откалибрована для вычислительной эффективности с помощью серии исследований чувствительности сетки конечных элементов. Разработанная модель также проверена с помощью нескольких экспериментов ЭЛАП. Fatih Sikan и др. [3] исследовали прогнозируемые остаточные напряжения и температуру, влияющую на глубину ванны расплава подложки, достигнута удовлетворительная степень соответствия прогнозируемых и экспериментальных результатов. Однако задача полного математического описания процессов, протекающих при электронно-лучевой наплавке металлов еще требует своего решения.

Целью настоящей работы является разработка цифрового двойника формообразования изделий из титана методом электронно-лучевой наплавки проволоки в вакууме. Планируется разработка модели для исследований процессов, происходящих при послойном нанесении титанового сплава на подложку с использованием программного комплекса ANSYS. Программный продукт дает возможность моделировать и анализировать различные физические процессы, происходящие при электронно-лучевой наплавке титановой проволоки, а также выполнять расчет остаточных напряжений и деформаций изделия.

Математическая модель включает в себя модель источника теплового воздействия и подложку из титанового сплава (рисунок 2).

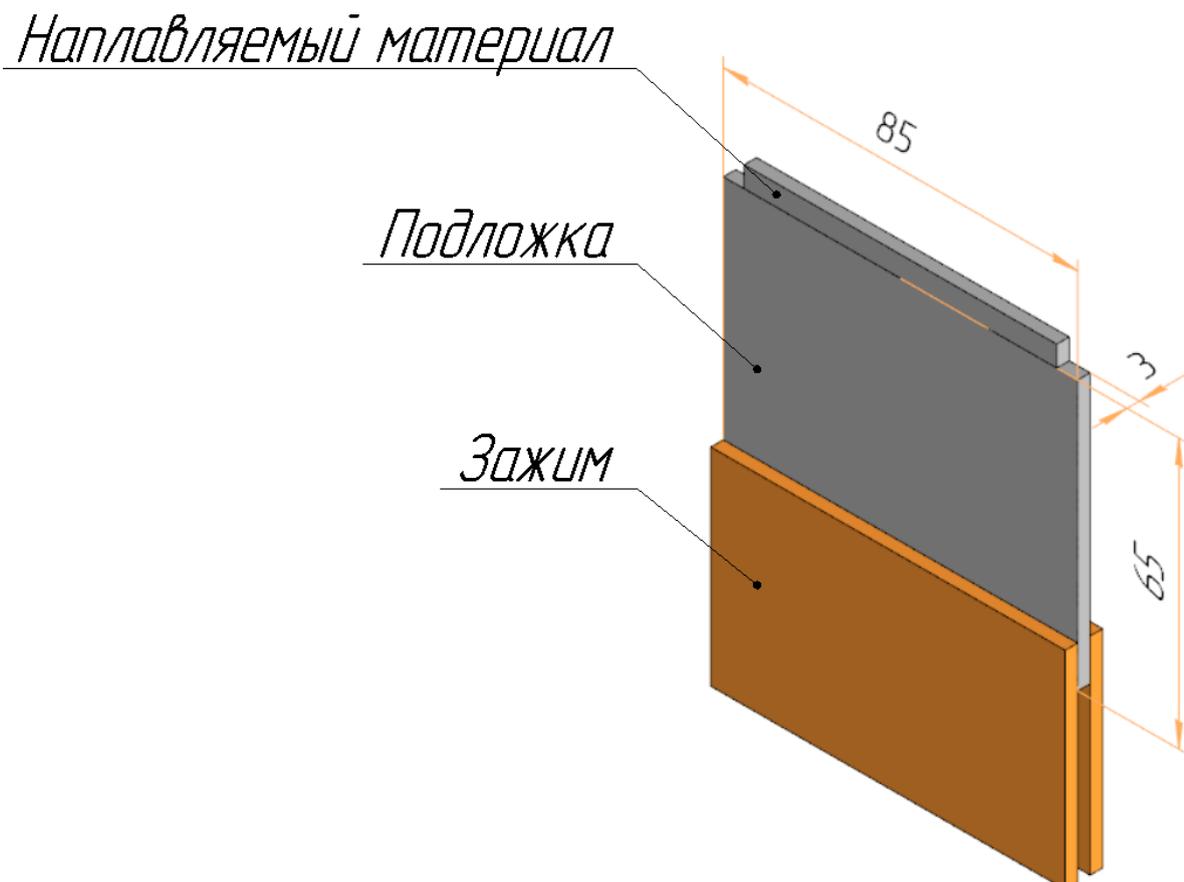


Рисунок 2. Схема геометрии образца

При моделировании процесса ЭЛАП в качестве подложки планируется использовать пластину из титанового сплава марки Ti-6Al-4V, размеры которой составляют 85 мм в ширину, 65 мм в высоту и 3 мм в толщину, рисунок 2. Наплавляемый материал – проволока Ø0,9 мм из титанового сплава той же марки (Ti-6Al-4V). В качестве зажима используется медные пластины. Подложка, установленная в зажиме, охлаждается до температуры окружающей среды под вакуумом.

В работе планируется использовать стратегию двунаправленного сканирования, при которой следующие слои будут иметь противоположные направления сканирования. Скорость перемещения и скорость подачи проволоки будет принята 3,81 мм/с и 8,5 мм/с соответственно, согласно [3].

В основе решения поставленной задачи лежит численная аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности, которое в общем случае имеет вид

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q,$$

где $T = T(x, \tau)$ – температура; C – теплоемкость единицы массы; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; $Q = Q(x, \tau)$ – плотность тепловых источников, т. е. количество тепла, выделяющееся в единицу времени в единице объема; τ – время.

Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность могут зависеть от температуры, времени и координат.

Основным результатом проекта станет разработка новых подходов к автоматизации и управлению процессов аддитивного производства с целью их интеграции в сложные системы, предназначенные для послойного формообразования высокопрочных изделий. На основе полученных фундаментальных результатов будет разработана численная модель процессов многопроходной вакуумной электронно-лучевой наплавки титанового сплава, позволяющей создавать детали с заданными свойствами с высокой скоростью, точностью и экономическим преимуществом. Будет разработан алгоритм для проведения численного анализа процессов послойного формирования изделий из титана методом электронно-лучевой наплавки проволоки. Будет проведена многофакторная оптимизация по основным параметрам технологического процесса послойной электронно-лучевой наплавки в вакууме и установлены предпочтительные режимы формообразования. Результаты будут способствовать интенсивному внедрению цифровых технологий в аддитивное производство.

Тестирование стратегии расчета будет осуществляться методом сравнения результатов решения задачи с известными из литературы результатами экспериментов. Достоверность результатов будет подтверждаться их непротиворечивостью с данными других авторов.

Список литературы

1. Haradhan K.M. Third Industrial Revolution Brings Global Development / K.M. Haradhan // Journal of Social Sciences and Humanities. – 2021. – № 4. – С. 239-251.
2. Byron Blakey-Milner. Metal additive manufacturing in aerospace: A review / Byron Blakey-Milner, Paul Gradl, Glen Snedden, Michael Brooks, Jean Pitot, Elena Lopez, Martin Leary, Filippo Berto, Anton du Plessis // Materials & Design. – 2021. – № 209.
3. Sikan F., Wanjara P., Gholipour J., Kumar A., Brochu M. Thermo-Mechanical Modeling of Wire-Fed Electron Beam Additive Manufacturing / F. Sikan, P. Wanjara, J. Gholipour, A. Kumar, M. Brochu // Materials. – 2021. – № 14. – С. 911.