

# РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ ИЗ ТИТАНА С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НАПЛАВЛЯЕМОМ МАТЕРИАЛЕ И ПОДЛОЖКЕ

Савлук А.А.<sup>1</sup>, Савлук Д.А.<sup>2</sup>, Лысак Г.В.<sup>3</sup>, Лысак И.А.<sup>4</sup>  
Томский политехнический университет  
e-mail: aas293@tpu.ru

В статье рассмотрена задача разработки математической модели формообразования изделий из титана методом электронно-лучевой наплавки проволоки в вакууме.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая проволочная аддитивная технология, математическое моделирование, титановый сплав, послойная наплавка, компьютерная инженерия.

## Введение

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.

Для изготовления крупногабаритных деталей, как правило, наиболее перспективными являются проволочные методы прямого осаждения материалов, такие как электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) [1].

Электронно-лучевой источник тепла имеет определенные преимущества при обработке материалов из-за его высокой энергоэффективности и возможности использовать собственные высокие скорости сканирования для поддержания высокой температуры окружающей среды в вакууме. Однако образование дефектов препятствует дальнейшему применению ЭЛАП. Нестабильные ванны расплава приводят к появлению некоторых дефектов, связанных со стабильностью обработки, таких как дымление, разбрызгивание, высокое остаточное напряжение и деформация [2].

## Описание теоретических исследований

Целью настоящей работы является разработка модели для исследования остаточных напряжений, возникающих при послойном нанесении титанового сплава на подложку с использованием программного комплекса ANSYS.

Математическая модель включает в себя модель источника теплового воздействия и подложку из титанового сплава марки ВТ6 (рис. 1). Наплавляемый материал – проволока Ø0,9 мм из титанового сплава той же марки. В качестве зажима используются медные пластины. Подложка, установленная в зажиме, охлаждается до температуры окружающей среды под вакуумом.

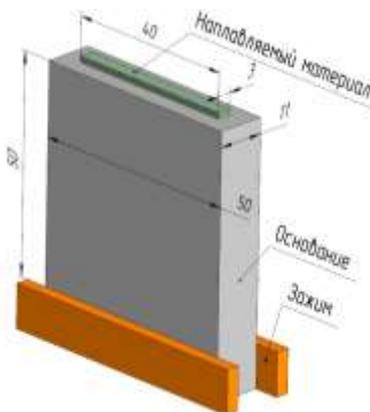


Рис. 1. Схема геометрии образца

Применение граничных условий для каждой поверхности подложки представлено на рис. 2.

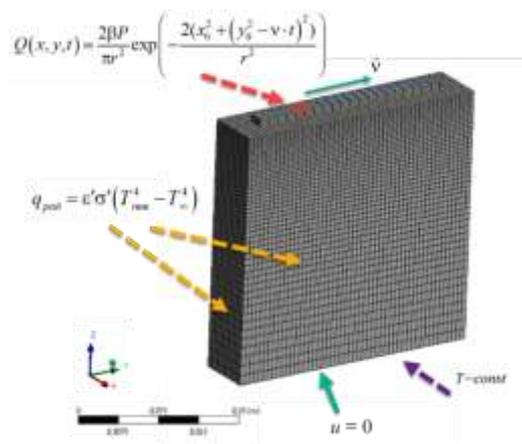


Рис. 2. Схема теплообмена титановой подложки

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены прогнозируемые эквивалентные остаточные напряжения в результате наплавки.

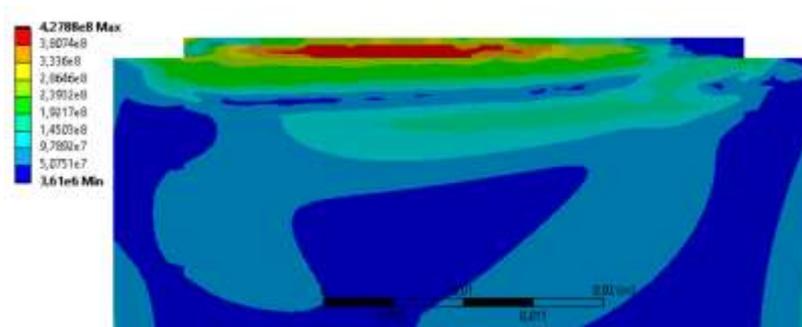


Рис. 3. Эквивалентные остаточные напряжения в результате наплавки

Представленные данные позволяют сделать вывод, что в результате наплавки возникают большие остаточные напряжения в объеме наплавленного образца и титановой подложке, следовательно необходима релаксация образца.

Созданная модель может стать основой для дальнейшей разработки системы, позволяющей воспроизводить рациональную траекторию сканирующего луча с оптимальной частотой и мощностью с целью изготовления деталей из различных материалов с заданными характеристиками.

### Список литературы

1. Byron Blakey-Milner. Metal additive manufacturing in aerospace: A review [Текст] / Byron Blakey-Milner, Paul Gradl, Glen Snedden, Michael Brooks, Jean Pitot, Elena Lopez, Martin Leary, Filippo Berto, Anton du Plessis // *Materials & Design*. – 2021. – № 209.
2. Yilei Shi, Shuili Gong, Haiying Xu, Guang Yang, Junnan Qiao, Zhuang Wang, Jianchao Zhang, Bojin Qi Electron beam metal additive manufacturing: Defects formation and in-process control [Текст] / Yilei Shi, Shuili Gong, Haiying Xu, Guang Yang, Junnan Qiao, Zhuang Wang, Jianchao Zhang, Bojin Qi // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – № 101. – P. 386–431.
3. Rouquette S.; Guo J.; Le Masson P. Estimation of the parameters of a Gaussian heat source by the Levenberg–Marquardt method: Application to the electron beam welding // *Int. J. Therm. Sci.* – 2007. – 46. – P. 128–138. [CrossRef].