

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ В ВАКУУМЕ

Лысак Г.В.¹, Сорокова С.Н.²

¹ ТПУ ИШНПТ ОМШ гр. 4АМ2К,

E-mail: gv12@tpu.ru;

² ТПУ ИШНПТ ОМШ к.ф.-м.н., доц.,

E-mail: s_sorokova@tpu.ru

Изделия из титана широко используются в авиации, космической промышленности, медицине и других отраслях [1–3]. Аддитивные технологии позволяют создавать сложные геометрические формы деталей без необходимости использования сложных инструментов и форм, что значительно упрощает производственный процесс. Наиболее перспективный метод изготовления деталей из титановых сплавов с использованием аддитивных технологий – это метод электронно-лучевой наплавки проволоки в вакууме, этот метод позволяет получать детали с высокой точностью и качеством [4, 5]. Процесс электронно-лучевой наплавки проволоки в вакууме происходит в специальной камере, в которой создается высокий вакуум. Проволока из титана подается в камеру и расплавляется при помощи электронного луча, который создается в специальном устройстве. Расплавленный титан наносится на поверхность заготовки, которая находится в камере.

Основные преимущества метода электронно-лучевой наплавки проволоки в вакууме заключаются в достижении высокой точности размеров и минимальных потерь материала, что делает его экономически эффективным. Однако, для получения оптимальных результатов необходимо учитывать множество факторов, таких как температура, скорость нанесения и толщина слоя. Выбор рациональных параметров теплового воздействия существенно влияет на качество при послойном формообразовании. Важными являются скорость и интенсивность теплового воздействия, при этом необходим постоянный контроль распределения температуры, как на поверхности, так и внутри изделия [6, 7]. Экспериментальное исследование исследования тепловых полей внутри материала при высококонцентрированном тепловом воздействии движущегося источника тепла при послойном сплавлении материала электронным лучом в вакууме затруднительно, поэтому перспективно использовать методы инженерного анализа, основанные на применении CAE систем. Математическое моделирование теплофизических процессов позволит установить предпочтительные режимы обработки изделий без многочисленных экспериментальных исследований. Настоящая работа посвящена созданию модели теплового состояния стальной подложки при послойном нанесении титанового сплава марки ВТ-6 с использованием программного комплекса ANSYS Workbench. Данная программа позволяет моделировать и анализировать различные физические процессы, происходящие при электронно-лучевой наплавке титановой проволоки, а также выполнять расчет остаточных напряжений и деформаций изделия.

Математическая модель теплового состояния стальной подложки включает в себя модель источника теплового воздействия и пластину из нержавеющей стали. В основе решения поставленной задачи лежит численная аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности, которое в общем случае имеет вид

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla (\lambda \nabla T) + Q, \quad (1)$$

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; \vec{x} – вектор, характеризующий

положение точки в пространстве; τ – время. Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность могут зависеть от температуры, времени и координат.

Уравнение (1) с надлежащими начальными и граничными условиями представляет задачу о распределении температуры в каждой точке рассматриваемого объема вещества для любого момента времени. При этом предполагается, что начальное распределение температуры в материале и температурный режим на его границах известны, внутренние источники тепловыделения отсутствуют, тепловой источник имеет постоянную мощность и перемещается с постоянной скоростью вдоль оси x , коэффициент теплопроводности есть функция температуры $\lambda = f(T)$, а вдоль оси y исследуемый объект является полубесконечным, что дает нам право ограничиться уравнением в двумерной системе координат.

Запишем уравнение (1) в декартовой системе координат с учетом сделанных предположений

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где C_p – удельная изобарная теплоемкость.

Начальное условие характеризует распределение температуры в объеме в момент времени $\tau = 0$ и имеет вид:

$$\tau = 0 \quad T = T_0. \quad (3)$$

Граничные условия (ГУ) описывают тепловые режимы на границах рассматриваемого тела. При этом на границах $0 - h$ и $l - h$ (рис. 1) принимаются граничные условия второго рода (ГУ II), подразумевающие отсутствие стока тепла, т. е. производная от температуры по нормали к поверхности приравнивается нулю

$$-\lambda_1 \left(\frac{dT}{dn} \right)_n = q_n = 0. \quad (4)$$

На противоположной тепловоспринимающей поверхности $h - l$ задается соотношение, связывающее значение температуры с величиной теплового потока (граничные условия третьего рода (ГУ III)). В этом случае тепловой поток пропорционален разности температур границы и окружающей среды

$$-\lambda_1 \left(\frac{dT}{dn} \right)_{ct} = \alpha (T_{ct} - T_{ж}). \quad (5)$$

Здесь коэффициент теплопроводности λ , коэффициент теплоотдачи α и температура окружающей среды $T_{ж}$ должны быть известны.

На тепловоспринимающей поверхности $0 - l$ приняты сложные граничные условия, зависящие от времени и координат. Условно разделим поверхность $0 - l$ на три участка: первый, при $\tau_1 > \tau > 0$, характеризуется отсутствием теплового воздействия и описывается ГУ II (4); второй, при $\tau_2 > \tau > \tau_1$, тепловое состояние поверхности характеризуется величиной плотности радиально распределенного теплового потока, зависимость для ГУ II запишется в виде

$$-\lambda_1 \left(\frac{dT}{dn} \right)_n = q_n(\tau, x), \quad (6)$$

радиальное распределение плотности потока описывалось Гауссовской зависимостью. На третьем участке $\tau > \tau_2$ наблюдается охлаждение поверхности в условиях естественной конвекции, что может быть также описано зависимостью (5).

Применение граничных условий для каждой поверхности подложки представлено на рис. 1.

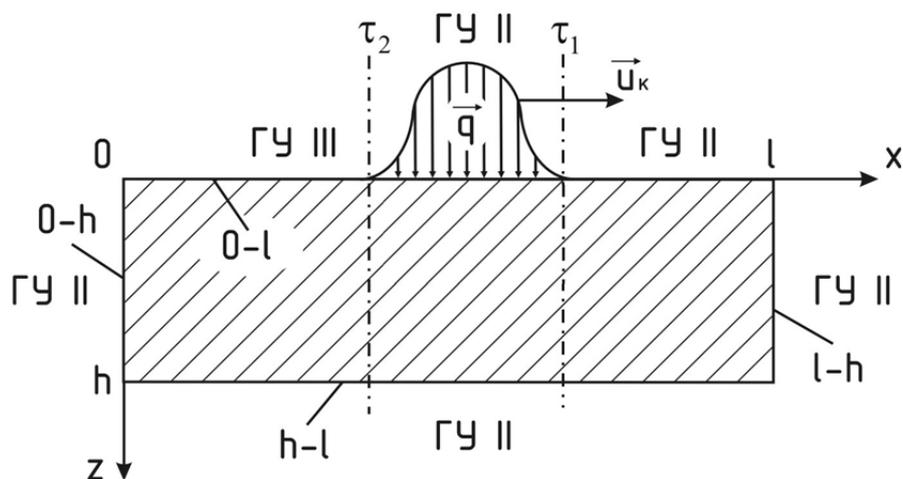


Рис. 1. Схема теплообмена стальной подложки

\vec{u}_k – вектор скорости перемещения теплового источника; τ_1 – момент начала теплового воздействия; τ_2 – момент окончания теплового воздействия

При определении коэффициента теплоотдачи использовались эмпирические зависимости, описывающие теплообмен в условиях естественной конвекции для горизонтально расположенной пластины.

Результаты численного эксперимента позволят установить закономерности распределения температуры и скорости её изменения от действия электронного пучка

Список литературы

1. Murr L.E. Metallurgy of additive manufacturing: examples from electron beam melting // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 5. – P. 40–53. – DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.002.
2. Milevski J.O. Additive manufacturing of metals: from fundamental technology to rocket nozzles, medical implants and custom jewelry. – Cham: Springer, 2017. – 351 p. – ISBN 978-3-319-58205-4.
3. Additive manufacturing of metallic materials: a review/ Y. Zhang, L. Wu, X. Guo, S. Kane, Y. Deng, Engineering and Performance. – 2018. – Vol. 27, iss. 1. – P. 1–13. – DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.
4. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing / T. DebRoy, T. Mukherjee, H.L. Wei, J.W. Elmer, J.O. Milewski // Nature Reviews Materials. – 2020. – Vol. 6. – P. 48–68. – DOI: 10.1038/s41578-020-00236-1.
5. Edwards P., O’Conner A., Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2013. – Vol. 135, iss. 6. – P. 061016. – DOI: 10.1115/1.4025773.
6. Tavlovich B., Shirizly A., Katz R. EBW and LBW of additive manufactured Ti6Al4V products // Welding Journal. – 2018. – Vol. 97, iss. 6. – P. 179–190. – DOI: 10.29391/2018.97.016.
7. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products / S. Peleshenko, V. Korzhyk, O. Voitenko, V. Khaskin, V. Tkachuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3/1, iss. 87. – P. 42–52. – DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99666.