

УДК 621.791.9:004.942

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ТИТАНА В ВАКУУМЕ**

Савлук А.А.<sup>1</sup>, аспирант гр. А5-20, I курс, Савлук Д.А.<sup>2</sup>, инженер-технолог,  
Лысак Г. В.<sup>1</sup>, старший преподаватель

Научный руководитель: Лысак И.А.<sup>1</sup> к.т.н., доцент

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

г. Томск

<sup>2</sup>Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания»  
г. Томск

### **Введение**

Современная промышленность переживает глобальную трансформацию, связанную с переходом от традиционных методов производства к аддитивным технологиям. Среди многообразия методов послойного синтеза особое место занимает электронно-лучевая аддитивная печать (ЭЛАП). Данная технология, основанная на плавлении металлической проволоки или порошка сфокусированным пучком электронов в условиях высокого вакуума, обладает рядом уникальных преимуществ перед лазерными аналогами: более высокой производительностью, энергетической эффективностью и возможностью работы с активными и тугоплавкими металлами в стерильных условиях. Как отмечают исследователи в фундаментальном обзоре металлургии аддитивных процессов [1], именно специфика кристаллизации при использовании концентрированных потоков энергии определяют финальные эксплуатационные характеристики изделия.

Однако, несмотря на высокую технологическую эффективность, изделия, полученные методом ЭЛАП, сталкиваются с серьезной проблемой – возникновением значительных остаточных напряжений. Природа формирования остаточных напряжений в аддитивном производстве носит комплексный термомеханический характер. В процессе ЭЛАП материал подвергается циклическому воздействию высококонцентрированного источника энергии, что приводит к возникновению экстремальных температурных градиентов и высоких скоростей охлаждения. Послойное наплавление вызывает неравномерное термическое расширение и последующую усадку слоев, которые жестко сдерживаются уже затвердевшим основанием (подложкой) или предыдущими слоями.

Наличие неконтролируемых остаточных напряжений ведет к ряду негативных последствий: короблению (дисторсии) геометрической формы, снижению усталостной прочности и инициации трещин непосредственно в процессе

печати. Особенности реализации процесса в вакууме накладывают дополнительный отпечаток на теплообмен: отсутствие конвекции смещает баланс охлаждения в сторону теплопроводности через подложку и радиационного излучения. Это изменяет профиль распределения напряжений по сравнению с методами, реализуемыми в газовой среде. Кроме того, на формирование напряженного состояния влияет специфическая мезоструктура аддитивного металла. Как показано в исследованиях Соловьёвой [2], выраженная кристаллографическая текстура и анизотропия свойств, характерные для электронно-лучевых методов, требуют особого подхода к интерпретации данных при использовании дифракционных методов контроля.

В связи с этим, критически важной задачей является разработка и верификация методов точного определения остаточных напряжений в изделиях ЭЛАП. Существующие подходы, такие как метод рентгеновской дифракции, метод сверления отверстий и контурный метод, нуждаются в адаптации под специфику аддитивного производства. Настоящая работа направлена на исследование распределения остаточных напряжений в образцах, полученных на основе термомеханического численного анализа в программном комплексе ANSYS Workbench.

### Описание математической модели

Математическая модель теплового и напряжённо-деформированного состояния исследуемой системы включает в себя модель источника теплового воздействия и пластину из титанового сплава (рис. 1).

При моделировании процесса ЭЛАП в качестве подложки используется пластина из титанового сплава марки ВТ6. Наплавляемый материал – проволока Ø0,9 мм из титанового сплава марки ВТ6. В качестве зажима используются медные пластины. Подложка, установленная в зажиме, охлаждается до температуры окружающей среды под вакуумом.

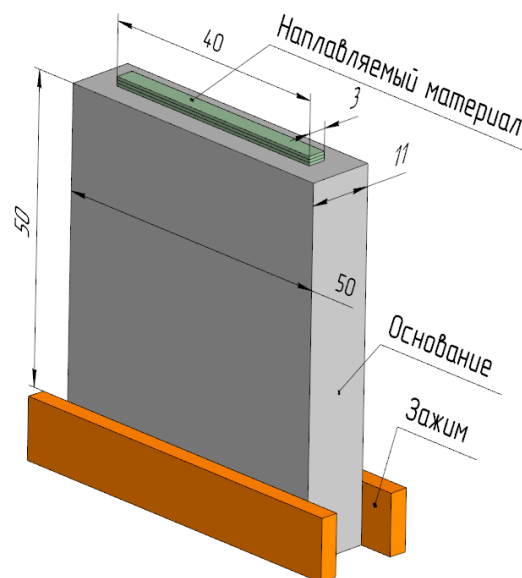


Рисунок 1 – 3D-модель

В основе решения поставленной задачи лежит численная аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности, которое в общем случае имеет вид [3]:

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

где  $T = T(x, \tau)$  – температура;

$C$  – теплоемкость единицы массы;

$\rho$  – плотность;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$Q = Q(x, \tau)$  – плотность тепловых источников, т. е. количество тепла, выделяющееся в единицу времени в единице объема;

$\tau$  – время.

Профиль распределения интенсивности был взят и модифицирован на основе уравнения, предложенного Рукетом и др. [4].

$$Q(x, y, t) = \frac{2\beta P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2 + (y - v \cdot t)^2)}{r^2}\right), \quad (2)$$

где  $P$  – тепловая мощность источника излучения, Вт;

$r$  – радиус светового пятна, м;

$x, y$  – координаты источника нагрева, м;

$v$  – скорость сканирования, м/с;

$\beta$  – коэффициент поглощения излучения.

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

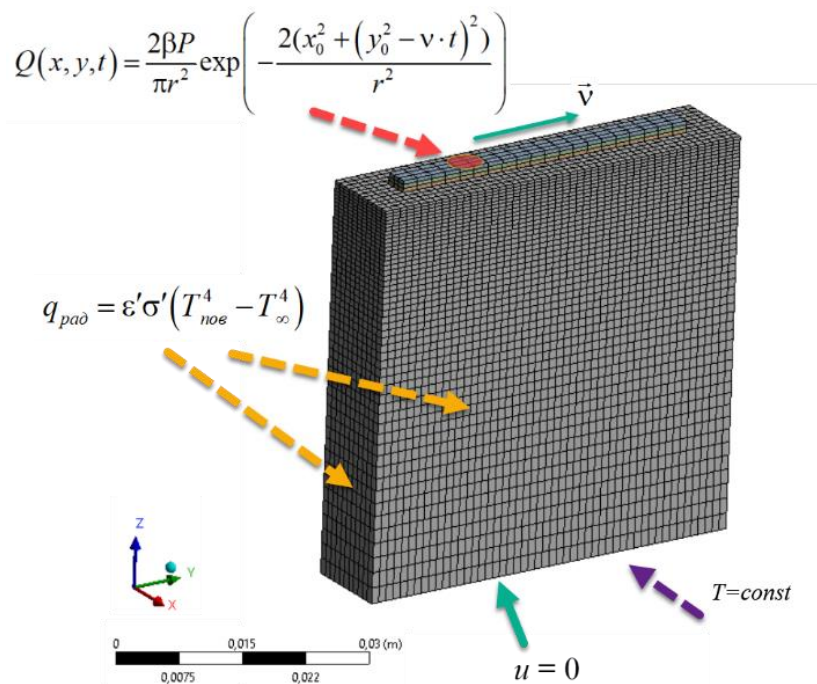


Рисунок 2 – Схема теплообмена титановой подложки

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

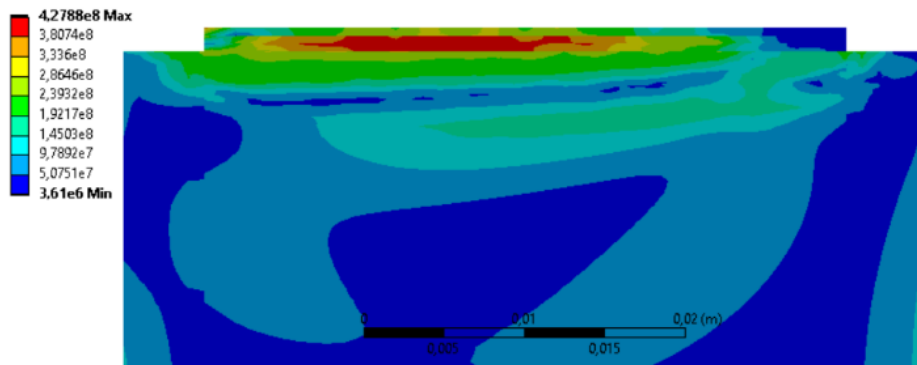


Рисунок 3 – Контурная диаграмма эквивалентных остаточных напряжений в результате наплавки

Технологические параметры процесса ЭЛАП, такие как короткое время воздействия и высокая скорость тепловложения создают большой градиент температуры в области наплавки, что способствует формированию в зоне образца и в титановой подложке окружных и осевых напряжений. Как видно из контурной диаграммы, наибольшие напряжения возникают на верхних слоях и составляют порядка 430 МПа. В зоне подложки остаточные напряжения находятся в диапазоне от 100 до 240 МПа. Остаточные напряжения снижаются к границам наплавленного материала и увеличиваются к центру. Как правило, для материала ВТ6 остаточные напряжения в зоне термического влияния составляют 200 МПа. Если сравнивать остаточные напряжения с пределом текучести  $\sigma_T = 900$  МПа и пределом прочности  $\sigma_B = 1000$  МПа, можно установить, что напряжения не приведут к необратимым изменениям формы и размеров тела. Однако наличие остаточных напряжений в наплавленном материале может негативно повлиять на свойства материала и конструкции. Анализ данных, полученных в результате численного исследования, выявил необходимость проведения релаксации.

### Выводы

Настоящее исследование позволило оценить проблему остаточных напряжений в изделиях, изготовленных методом электронно-лучевой аддитивной печати в вакууме. Полученные результаты подтверждают высокую значимость контроля остаточных напряжений для обеспечения надежности и эксплуатационной пригодности деталей, произведенных по данной аддитивной технологии.

Подтверждена высокая степень остаточных напряжений – исследование на образцах термомеханического численного анализа в программном комплексе ANSYS Workbench, полученных методом ЭЛАП выявили наличие значительных остаточных напряжений. Их величины часто приближаются к пределу текучести материала, что было продемонстрировано расчетной моделью.

Эти напряжения обусловлены сложной термомеханической историей процесса: неравномерным нагревом, экстремальными температурными градиентами и последующей неравномерной усадкой в условиях вакуума.

Специфика теплообмена в вакууме (доминирование теплопроводности и радиационного охлаждения) приводит к формированию отличного от атмосферных процессов распределения остаточных напряжений. В частности, наблюдается тенденция к увеличению тангенциальных и осевых напряжений в центре сечения по сравнению с приповерхностными слоями, что требует учета при выборе стратегии производства и методов контроля.

### Список литературы

1. Thermally stable coexistence of liquid and solid phases in gallium nanoparticles / Losurdo, M., Suvorova, A., Rubanov, S. [et al.]. – Text : electronic // Nature Mater. – 2016. – № 15. P. 995–1002 – URL: <https://doi.org/10.1038/nmat4705> (дата обращения: 26.02.2026).

2. Соловьёва А. С. Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии : дис. / Соловьёва Анна Сергеевна. – Томск, 2019. – 111 с. – Текст : непосредственный.

3. Контроль свойств материалов изделий при их изготовлении путем управления режимами электронно-лучевой наплавки / А. А. Савлук, Д. А. Савлук, Г. В. Лысак [и др.]. – Текст : электронный // Инновации в машиностроении (ИнМаш - 2024) : Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 22–23 ноября 2024 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет – 2024. – С. 135–141. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=77101316> (дата обращения: 26.02.2026).

4. Rouquette, S. Estimation of the parameters of a Gaussian heat source by the Levenberg–Marquardt method / S. Rouquette, J. Guo, P. Le Masson – Text : electronic // Int. J. Therm. Sci. 2007, 46, P. 128–138 – URL: [https://www.researchgate.net/publication/245074910\\_Estimation\\_of\\_the\\_parameters\\_of\\_a\\_Gaussian\\_heat\\_source\\_by\\_the\\_Levenberg-Marquardt\\_method\\_Application\\_to\\_the\\_Electron\\_Beam\\_Welding](https://www.researchgate.net/publication/245074910_Estimation_of_the_parameters_of_a_Gaussian_heat_source_by_the_Levenberg-Marquardt_method_Application_to_the_Electron_Beam_Welding) (дата обращения: 26.02.2026).

### Список используемых источников

1. Thermally stable coexistence of liquid and solid phases in gallium nanoparticles / Losurdo, M., Suvorova, A., Rubanov, S. [et al.]. – Text : electronic // Nature Mater. – 2016. – № 15. P. 995–1002 – URL: <https://doi.org/10.1038/nmat4705> (дата обращения: 26.02.2026).

2. Соловьёва А. С. Особенности структурно-фазового состояния сплава Ti-6Al-4V при формировании изделий с использованием электронно-лучевой

проволочной аддитивной технологии : дис. / Соловьёва Анна Сергеевна. – Томск, 2019. – 111 с. – Текст : непосредственный.

3. Контроль свойств материалов изделий при их изготовлении путем управления режимами электронно-лучевой наплавки / А. А. Савлук, Д. А. Савлук, Г. В. Лысак [и др.]. – Текст : электронный // Инновации в машиностроении (ИнМаш - 2024) : Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 22–23 ноября 2024 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет – 2024. – С. 135-141. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=77101316> (дата обращения: 26.02.2026).

4. Rouquette, S. Estimation of the parameters of a Gaussian heat source by the Levenberg–Marquardt method / S. Rouquette, J. Guo, P. Le Masson – Text : electronic // Int. J. Therm. Sci. 2007, 46, P. 128–138 – URL: [https://www.researchgate.net/publication/245074910\\_Estimation\\_of\\_the\\_parameters\\_of\\_a\\_Gaussian\\_heat\\_source\\_by\\_the\\_Levenberg-Marquardt\\_method\\_Application\\_to\\_the\\_Electron\\_Beam\\_Welding](https://www.researchgate.net/publication/245074910_Estimation_of_the_parameters_of_a_Gaussian_heat_source_by_the_Levenberg-Marquardt_method_Application_to_the_Electron_Beam_Welding) (дата обращения: 26.02.2026).