

УДК 620.179.16

**Ультразвуковое исследование образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методами аддитивного производства**М.М. Цыплаков

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Г.В. Гаранин  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mmc5@tpu.ru](mailto:mmc5@tpu.ru)**Ultrasonic examination of titanium alloy Ti-6Al-4V samples produced by additive manufacturing methods**M.M. Tsyplakov

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., PhD., G.V. Garanin  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [mmc5@tpu.ru](mailto:mmc5@tpu.ru)

**Abstract.** *The main advantage of additive technologies is the layer-by-layer growth of products, allowing, in particular, to obtain parts with such geometric shape, which in many cases cannot be obtained by classical production methods (rolling, stamping, cutting, etc.). Microstructure formation in metal products of additive manufacturing is almost entirely determined by the configuration of printing settings: the speed of scanning of the energy beam over the surface layer of powder electron beam melting, the size of powder's particles, and the density of the energy flux supplied to the powder. Physical and technical features of ultrasonic control suggest the possibility of its implementation in additive manufacturing, since elastic waves of high frequencies propagating in the object of control, emitted and received by moving sensors, allow characterize defects and elastic properties in the volume of the printed product. In this paper, the attenuation gradient of ultrasonic wave along the construction direction of the product is measured and observed.*

**Key words:** *non-destructive testing, attenuation of ultrasound, additive manufacturing.*

**Введение**

Металлическое аддитивное производство (3D-печать) является перспективным методом изготовления специфических изделий со специальным назначением. Основным преимуществом аддитивных технологий является послойное выращивание изделий, позволяющее, в частности, получать детали с такими геометрическими формами, которые во многих случаях нельзя получить классическими методами производства (прокат, штамповка, резание и др.). По-прежнему основным недостатком аддитивной печати металлами и сплавами остаётся пористость и неравномерность микроструктуры в объеме напечатанного изделия: поры — являются концентраторами напряжений, понижают упругие свойства, и повышают риски трещинообразования, а отличие среднего размера зерна в разных участках изделия приводит к сильной анизотропии механических свойств, что в большинстве практических приложений недопустимо [1]. Дефектообразование в металлических изделиях порошкового аддитивного производства практически полностью обусловлено конфигурацией настроек печати, то есть скоростью сканирования энергетического пучка по поверхностному слою порошка, например, в случае электронного селективного спекания (EBM), размерами порошинок, плотностью потока энергии, подводимого к порошку [2, 3].

Микроструктура во многом определяет механические и прочностные свойства материалов. Вариация микроструктурных характеристик в ходе производства, например, металлических заготовок, приводит к неопределённости их механических характеристик. Таким образом формируется задача организации качественного контроля микроструктурных характеристик материалов. В серии работ Оливии Кук и соавт. [4–6] показано,

что ультразвуковые методы применимы к решению задач контроля некоторых микроструктурных характеристик, в частности, среднего размера зёрен и пористости изделий металлического аддитивного производства.

Целью настоящей работы было проведение неразрушающего ультразвукового контроля образцов титана ВТ6, полученных методом ЕВМ-печати, и установление корреляций между акустическими константами материала и его микроструктурными характеристиками.

### Экспериментальная часть

Проводилось ультразвуковое исследование изделия, напечатанного методом электронно-лучевого спекания порошка сплава Ti-6Al-4V. Для акустического изучения отдельных участков изделия из него были вырезаны 14 образцов в виде пластинок толщинами около 4 мм, что схематически изображено на рисунке 1.

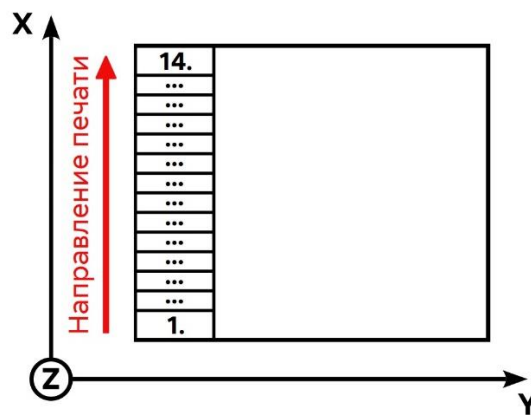


Рис. 1. Направление печати и схема нарезки образцов из изделия

Исследование проводилось в эхо-импульсном режиме одноэлементным пьезоэлектрическим датчиком-излучателем с рабочей частотой в 10 МГц, сканирующим объект контроля (ОК) в иммерсии. В качестве иммерсионной среды использовалась вода. На рисунке 2 приведены схема организации контроля и примерный вид снимаемых А-сканов.

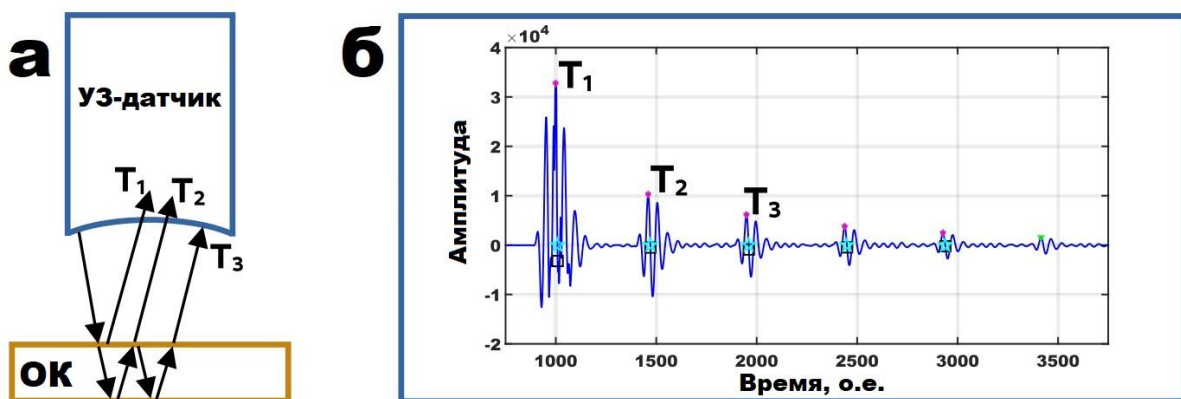


Рис. 2. Схема организации ультразвукового исследования:

(а) процесс сканирования и прием рефлекса, (б) временная развертка сигнала (А-скан)

Затухание ультразвука  $\alpha$  (Нп/мм) в образцах определялась и рассчитывалась по формуле:

$$\alpha = -\frac{1}{2t} \ln \frac{T_{n+1}}{T_n},$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания ультразвука,  $t$  – время прохождения ультразвуковой волной сквозь толщу образца,  $T_n$  – амплитуда n-ого ультразвукового рефлекса, отраженной от дна образца волны,  $T_{n+1}$  – амплитуда следующего донного рефлекса.

### Результаты

При обработке экспериментальных данных была выявлена следующая корреляция: затухание ультразвука тем больше, чем больше номер исследуемого образца (рисунок 3).

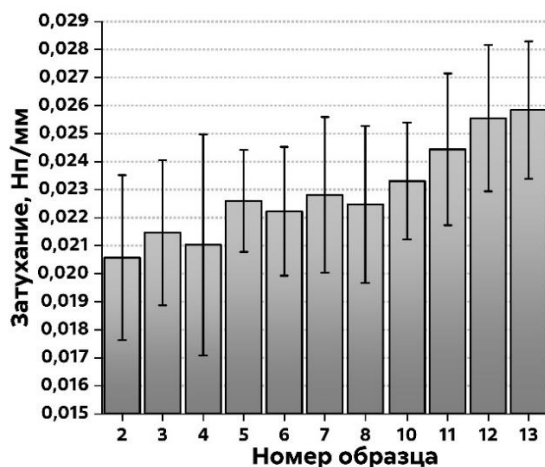


Рис. 3. Рост затухания в направлении печати исходного изделия

Легко заметить, что затухание ультразвука тем выше, чем дальше исследуемая зона изделия от его основания, то есть затухание растет вдоль направления печати.

### Заключение

По итогам проведенного исследования установлено, что затухание ультразвука имеет разные значения в различных участках напечатанного изделия. В частности, замечено, что затухание звука повышается вдоль направления выращивания объекта контроля.

Среди прочих причин наблюдаемого явления, следует выделить возможное уменьшение среднего размера зерна вдоль направления печати. Проверка выдвинутого предположения является предметом дальнейших исследований.

### Список литературы

1. Chakraborty, D., Tirumala, T., Chitral, S. et al. The State of the Art for Wire Arc Additive Manufacturing Process of Titanium Alloys for Aerospace Applications // J. of Materi Eng and Perform. – 2022. – V. 31. – P. 6149–6182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07128-1>.
2. Daxin Ren et al. Wire arc additive manufacturing of porous metal using welding pore defects // Materials & Design. – 2023. – V. 233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112213>.
3. Amir Mostafaei et al. Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2022. – V. 26, Issue 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2021.100974>.
4. Olivia Cook et al. Ultrasonic Characterization of Porosity in Components Made by Binder Jet Additive Manufacturing // Materials Evaluation. – 2022. – Vol. 80. – P. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.32548/2022.me-04266>.
5. Olivia Cook et al. Use of ultrasound to identify microstructure-property relationships in 316 stainless steel fabricated with binder jet additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2022. – V. 51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102591>.
6. Olivia Cook et al. Uncovering microstructural heterogeneities in binder jet printed SS316L through ultrasonic testing and X-ray computed tomography // Materials Characterization. – 2023. – V. 197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112697>.