

Хань Цзэли (Китай),
Яременко Олег.Борисович (Россия),
Куранов Александр Евгеньевич (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск,
ООО «Оптон Инжиниринг» г. Москва

Научный руководитель: Клименов Василий Александрович,
д-р техн. наук, профессор

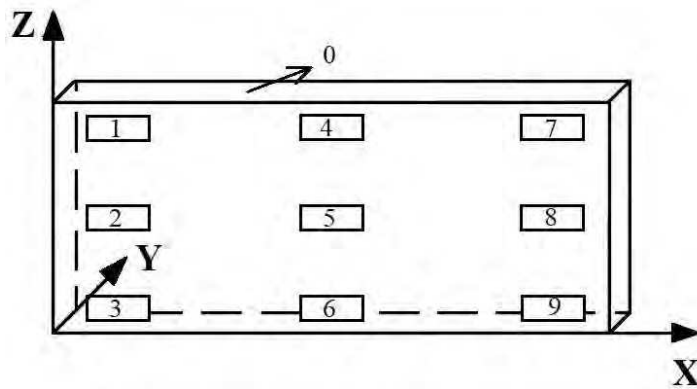
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Перед сборкой деталей машин обычно производят испытания механических свойств материала. Эти испытания обычно включают растяжение, сжатие, ударную вязкость и получение различных параметров с использованием методов неразрушающего контроля. Из всех методов неразрушающего контроля метод инструментального индентирования наиболее подходит для деталей, изготовленных методом металлической добавочной технологии. Используя такой метод, можно безопасно и быстро измерить механические свойства печатной детали без ее повреждения, оценить и использовать эту деталь. В этой статье мы провели измерение механических свойств титанового сплава, полученного с использованием технологии электронно-лучевого добавления, с помощью метода инструментального индентирования.

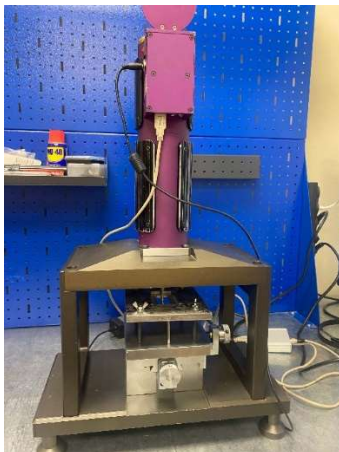
Образцы с размером $100 \times 80 \times 10$ мм³, были получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН [1]. Процесс формирования образца из сплава ВТ6св в виде проволоки диаметром 1,6 мм происходил в вакууме при давлении 10^{-3} – 10^{-2} Па. Образец для измерения механических свойств были фрезерованы с грубой подачей, его размер $90 \times 39 \times 4$ мм³. Проведены измерения в 9 разных зонах, выделены в вертикальном направлении (XZ), в каждой зоне измерили 3 раза. На горизонтальной поверхности (XY) измеряли 16 точек, схема зоны измерений показано на рис. 1 а.

Механические испытания были выполнены с помощью портативной системы инструментального вдавливания AIS-3000HD (Frontics Inc., Сеул, Южная Корея), внешний вид оборудования представлен на рис. 1(б) Вдавливание производилось сферическим индентором из твердого вольфрамокобальтового сплава (ВК5), с радиусом

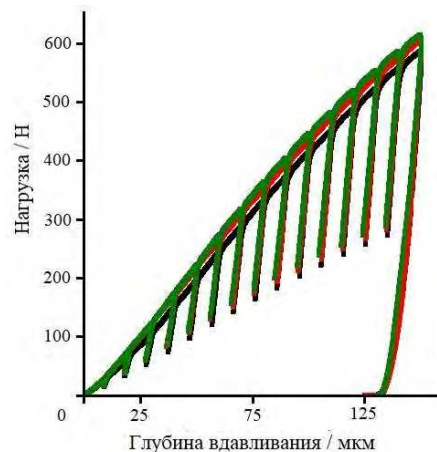
сферы – 250 мкм и 15 последовательностей нагрузки-разгрузки производились со скоростью 0,3 мм/мин. Кривые «нагрузка-глубина» непрерывно получались во время вдавливания и преобразовывались в кривые «истинного напряжения - истинной деформации». Все испытания на вдавливание проводились при комнатной температуре. На рис. 1(в) показаны примеры кривых «нагрузки-перемещения», полученных в данном исследовании. диаметр каждого отпечатка был в пределах 0,5 мм, что не нарушило целостности материала образца и не изменило его физические свойства. Данная установка с помощью Внешнем ПО позволяет определить механические характеристики материала (модуль упругости, твердость, остаточное напряжение, прочность на растяжение и трещиностойкость (вязкость разрушения)) по зависимости изменения нагрузки от глубины вдавливания [2,3].



а



б



в

Рис. 1. Схема зоны измерений: 0 – поверхность XY; 1-9 – зоны измерения в плоскости XZ(а), внешний вид измерительной машины AIS-3000HD(б), и кривые «истинного напряжения – истинной деформации» (в)

Полученные результаты, предел текучести, предел прочности, трещиностойкость и модуль упругости, в поверхностях XZ и XY, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Механические характеристики напечатанного титанового сплава

Зона испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Jc} (+20^\circ C)$	Модуль упругости, E
	МПа	МПа	МПа·м ^{0.5}	ГПа
XZ	703±12	895±12	79±32	115±22
XY	672±21	851±24	78±21	99±5

Данные в таблице 1 представляют собой среднее значение результатов измерений в плоскостях XY и XZ. Предел прочности образца, полученного методом электронно-лучевого сплавления проволоки ВТ6св, находится в пределах, которые написаны в стандарте ГОСТ 27265–87(665-865 МПа) [4]. Прочностные свойства в двух направлениях демонстрируют очевидную анизотропию, в перпендикулярном направлении выращивания (XZ) выше, чем в направлении выращивания (XY) на 31 МПа, это подтверждает и автор Suo, максимальная разница в пределе прочности в разных направлениях 61 МПа, получены испытанием на растяжение [5]. Значение трещиностойкости напечатанной детали: 79 МПа·м^{0,5}, данные, полученные на литом образце с шевронным надрезом из литого титанового сплава ВТ6 при традиционном методе испытаний, были 49-54 МПа·м^{0.5} [6]. Модуль упругости составляет 99-115 ГПа, также входит в диапазоне 90 – 145 ГПа выдающихся литературных данных [7].

Таким образом, детали из титанового сплава, напечатанные при помощи аддитивного производства с использованием электронного луча, обладают высокими механическими свойствами; метод инструментального индентирования может эффективно применен для определения механических свойств деталей, произведенных аддитивной технологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименов В.А., Колубаев Е.А., Клопотов А.А., Чумаевский А.В., Рубцов В.В., Хань Ц., Батрагин А.А., Стрелкова И.Л., Химич М.А., Никонов С.Ю. Применение методов физико-механических исследований и методов неразрушающего контроля при разработке аддитивных технологий с использованием титановых сплавов. // Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения. Тез. докл. Междунар. конф. Томск, Россия. – 2022. – С. 430–431.
2. Lee Jung-Suk, Jang Jae-il, Lee Baik-Woo, Choi Yeol, Lee Seung Gun, Kwon Dongil. An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics // *Acta Materialia*. – 2006. – V. 54., I. 4. – P. 1101–1109.
3. Белослудцев Т.Н., Котоломов А.Ю., Настич С.Ю., Лопаткин В.А., Шипилов А.В. Куранов А.Е. Яременко О.Б. Определение механических свойств металла кольцевых сварных соединений и основного металла труб методом инструментального индентирования. // Газовая промышленность. – 2021. – Спецвыпуск № 3. – С. 26–36.
4. ГОСТ 27265–87 Проволока сварочная из титана и титановых сплавов
5. Suo Hongbo, Chen Zheyuan, Liu Jianrong, Gong Shulli, Xiao Jianzhong Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V by Electron Beam Rapid Manufacturing // *Rare Metal Materials and Engineering*. – 2014, – V. 43., I. 4. – P. 0780–0785.
6. Дерюгин Е.Е., Суворов Б.И., Дервягина Л.С. Трещиностойкость материалов с ультрамелкозернистой структурой // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3., № 2(10). – С. 106–109.
7. Fougere G.E., Riester L., Ferber M, Weertman J.R., Siegel R.W. Young's modulus of nanocrystalline Fe measured by nanoindentation // *Materials Science and Engineering: A*. – 1995, –V. 204., – I. 1. P. 1–6.