

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО
СПЛАВА ВТ6СВ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ**

ЦЗЭЛИ ХАНЬ, СЮЙ ЧЖАН, Е.А. ДАРЕНСКАЯ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: hanzelizy@gmail.com

Понятие титановых сплавов часто появляется в научных статьях последних десятилетий, что свидетельствует о том, что к нему обращают внимание ученые всего мира. Благодаря высокой удельной прочности, хорошей коррозионной стойкости и превосходным высокотемпературным механическим свойствам он широко используется в аэрокосмической области для шасси, лопастей двигателя и других деталей. В то же время титановый сплав обладает хорошей биосовместимостью (по сравнению с нержавеющей сталью имеет более низкий модуль упругости) и является очень важным материалом для применения в области медицины [1, 2]. Несмотря на то, что он обладает многими превосходными характеристиками, из-за его низкой теплопроводности, деформационного упрочнения, низкого модуля упругости и других факторов, детали из титанового сплава трудно изготавливать традиционными методами механической обработки. Коэффициент использования материала низкий, а цена высокая. Появление технологии аддитивного производства может упростить обработку титановых сплавов, а низкие характеристики теплопроводности способствуют плавлению и формованию титановых изделий из порошковых или проволочных материалов. В связи с тем, что процесс получения мелкозернистого порошка титанового сплава сложен, а стоимость значительно выше стоимости проволоки, в данной работе исследованы физико-механические свойства деталей, полученных методом электронно-лучевой плавки с использованием в качестве сырья проволоки ВТ6св.

Материал марки ВТ6св имеет меньше легирующих элементов алюминия и ванадия по сравнению с материалом ВТ6, химические составы представлены в таблице 1. Образцы получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН. Процесс формирования образца из сплава ВТ6св проходил в вакууме при давлении 10^{-3} – 10^{-2} Па. В качестве подложки использовались пластины $150*60*2,5$ мм из ВТ1-0. Подложка размещалась на защитной подкладке из нержавеющей стали ($160*60*5$ мм) и всё вместе крепилось к охлаждаемому трёхкоординатному рабочему столу с помощью металлических прижимов. Стол имел жидкостное охлаждение, в процессе печати температура стола поддерживалась на уровне 13–15 °С.

Из напечатанного изделия вырезали образцы для определения нано- и микротвердости, а также измерения модуля упругости. Модуль упругости и нанотвердость деталей протестировали на NANO Indenter G200 (компания: MTS Systems Corporation, США), параметры испытания: начальная нагрузка на индентор 0 мН, максимальная нагрузка 500 мН, скорость нагружения и разгрузки $16 \text{ мН}\cdot\text{с}^{-1}$, продолжительность при максимальной нагрузке 10 с. Также измерили модуль упругости с помощью прибора Olympus 38DL PLUS (компания: Olympus, Япония). Микротвердость определяли на твердомер Durascan 20 G5 (компания: EMCO TEST, Австрия), параметры испытаний: нагрузка – 100 г, время непрерывного прессования – 10 секунд.

Таблица 1 – Химический состав титановых сплавов

Сплав	Ti	Al	V	Si	Fe	O	H	N	C	Сумма прочих примесей
BT6	Основа	5,3–6,8	3,5–5,3	0,10	0,60	0,20	0,015	0,05	0,10	0,60
BT6св	Основа	3,5–4,5	2,5–3,5	0,10	0,15	0,12	0,003	0,04	0,05	0,30

Результаты измерений представлены в таблице 2. Значение модуля упругости, измеренного методом ультразвука, составляет 133 ± 5 ГПа, среднее значение модуля упругости при индентировании приблизительно равно 179 ГПа, твердость индентирования составляет 3,8 ГПа. Микротвердость определяли вдоль направления печати через каждые 0,5 мм. Схема измерения представлена на рисунке 1. Значения микротвердости показаны на рисунке 2, средняя твердость составляет 263 HV.

Таблица 2 – Модули упругости, нано- и микротвердости

Модуль упругости методом ультразвука, E , ГПа	Модуль упругости при индентировании, E_{IT} , ГПа	Твердость индентирования, H_{IT} , ГПа	Микротвердости вдоль направления печати, $H_{ц}$, HV
133 ± 5	179 ± 20	$3,8 \pm 0,3$	263 ± 17

Модули упругости, полученные ультразвуковым методом и методом наноиндентирования, отличаются примерно на 26 %. Такую разницу в значениях модулей упругости для анизотропных материалов, измеренных разными методами, отмечают и авторы работы [3], а для изотропных материалов значения почти идентичны. Причины такого несоответствия вероятно связаны методами измерения. Точность результатов наноиндентирования зависит от функции площади, остроты индентора, анализа разгрузки, коэффициента Пуассона образца и др. [4, 5]. На точность измерений ультразвуковым методом оказывают влияние коэффициент звукопоглощения материала, коэффициент затухания звука и др.

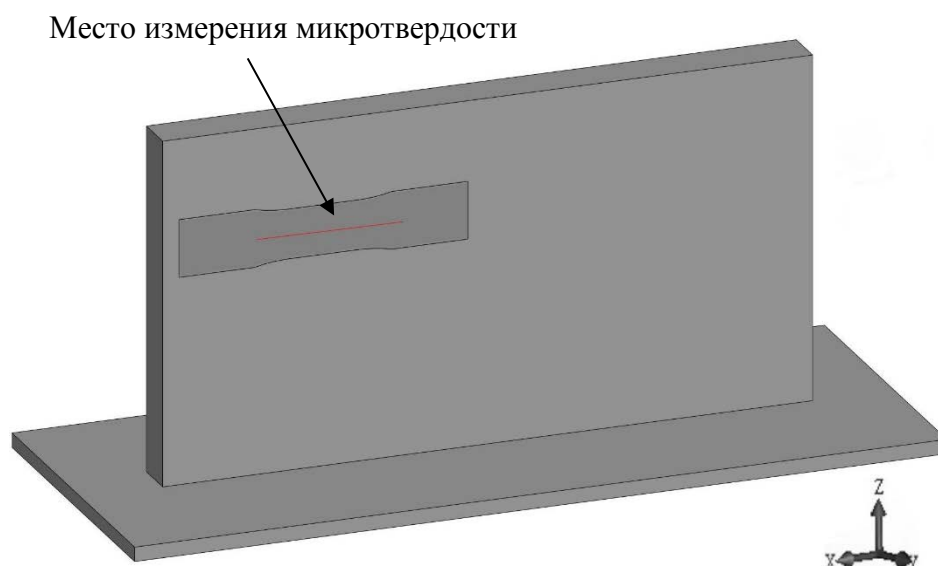


Рисунок 1 – Схема измерения микротвердости образца, вырезанного из полученной методом электронно-лучевой плавки пластины BT6св

Из графика, рисунок 2, видно, что значения микротвердости меняются во всей области измерения. Предположительно причина в том, что алмазный наконечник в процессе измерения попадает на различные фазы сплава. Требуются последующие исследования, чтобы подтвердить данное предположение.

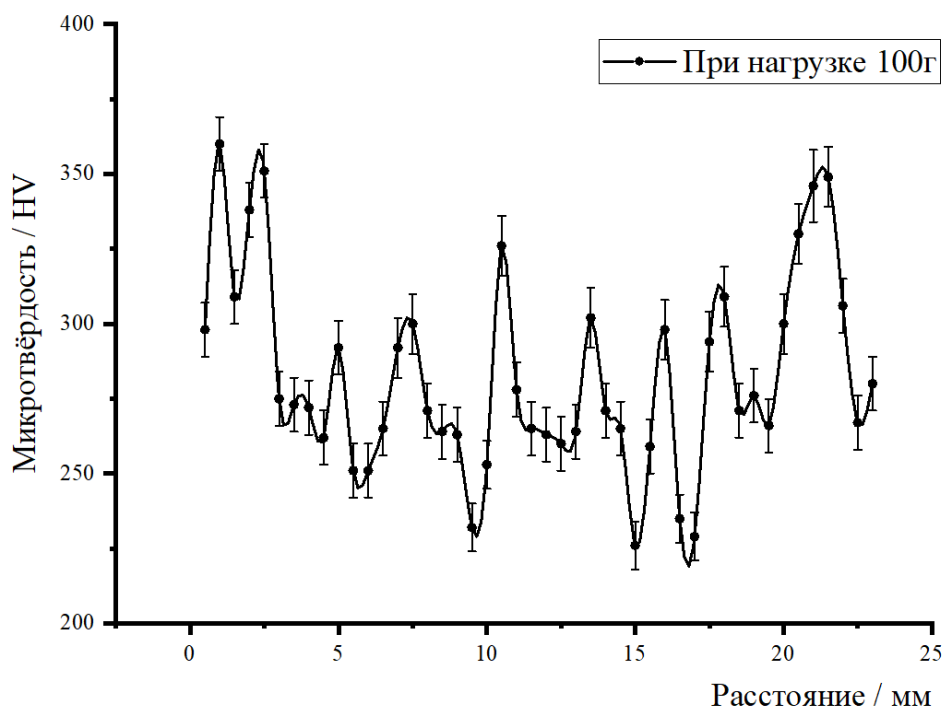


Рисунок 2 – Микротвердость вдоль направления печати

В данной работе измерены модуль упругости, нанотвердость и микротвердость образцов, полученных методом электронно-лучевой послойной плавки титанового сплава ВТ6св, с использованием различных методов измерения. Результаты экспериментов показывают, что для одной и той же детали из-за разных принципов измерения значения модуля упругости, полученные разными методами, отличаются, но заслуживают доверия. Также можно сделать вывод, что при сравнении полученных разными авторами экспериментальных данных одних и тех же механических свойств, следует обращать внимание на экспериментальные методы и условия их получения. Ввиду немногочисленных литературных данных об исследовании материала ВТ6св результаты, полученные в этом эксперименте, могут быть полезны другим исследователям титановых сплавов.

Список литературы

- 1 Gawel TG. Review of Additive Manufacturing Methods // Solid State Phenomena. – 2020. Vol. 308. – P. 1–20.
- 2 Клименов В.А., Колубаев У.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 // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения. – 2022. – С. 430–431.
- 3 Wu S.J., Chin P.C., Liu H. Measurement of Elastic Properties of Brittle Materials by Ultrasonic and Indentation Methods. // Applied Sciences. – 2019. Vol. 9(10). – P. 2067–2077.

- 4 Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. –2004. – Vol. 9(3).
- 5 Fischer-Cripps A.C. Nano-Indentation, 3rd ed. – Germany: Springer: Berlin/Heidelberg, 2011. – 302 p.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЛЬФРАМА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА БрАМц9-2-W, ПОЛУЧЕННОГО МНОГОПРОХОДНОЙ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ

А.М. ЧЕРЕМНОВ¹, Т.А. КАЛАШНИКОВА¹, А.В. ЧУМАЕВСКИЙ¹

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: amc@ispms.ru

Медь, благодаря своей превосходной электропроводности, теплопроводности, пластичности и обрабатываемости, является одним из наиболее широко используемых конструкционных материалов, применяющимся в различных отраслях машиностроения. Высокая теплопроводность меди и медных сплавов позволяет изготавливать из них такие компоненты как теплообменники, подшипники, втулки скольжения, электротехнические шины и прочее [1]. Однако, высокочистые медные сплавы обладают меньшей прочностью и износостойкостью по сравнению с другими конструкционными материалами, что делает их непопулярными в тех областях, где требуются большие значения прочностных характеристик изделий [2, 3]. Добиться этого можно с помощью легирования сплавов более прочными материалами, в частности, вольфрамом. Он обладает высокими значениями прочности на растяжение, тугоплавкости, объемного модуля упругости и плотности. Благодаря этому композит медь-вольфрам (Cu-W) сочетает в себе тугоплавкую твердую фазу вольфрама, которая обладает высокой прочностью и низким коэффициентом теплового расширения, и пластичную медную фазу с хорошими показателями электропроводности и теплопроводности. Это позволяет использовать его для производства контактных компонентов и теплоотводов [4].

Однако вольфрам и медь не растворимы друг в друге, а большая разница между их температурами плавления (3695 и 1358 К соответственно) негативно влияет на размер зерна, микроструктуру и, как следствие, плотность, твердость и прочность при спекании. К тому же для композитов с низким содержанием легирующего материала, особенно полученного литьем, характерны дефекты: поры и вольфрамовые агломераты [5]. Потому для получения бездефектного композита с равномерным распределением частиц в матрице используют другие методы, например, фрикционную перемешивающую обработку (ФПО). Она позволяет локально модифицировать материал с помощью адгезионного трения, приводящего к интенсивной пластической деформации материала. При этом нагрев не приводит к плавлению металла, что позволяет также избежать образования нежелательных фаз и межфазных реакций [6, 7]. Поэтому целью данной работы являлось установление влияния концентрации вольфрама на прочностные характеристики композита БрАМц9-2-W, полученного фрикционной перемешивающей обработкой.

В настоящей работе были исследованы образцы из листового проката толщиной 2 мм медного сплава БрАМц9-2 с содержанием порошка вольфрама 10 и 15% (образцы 1 и 2 соответственно) обработанные методом ФПО, схема процесса представлена на рисунке 1. Образцы были получены на оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения.