

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА VT6SV

Ц. ХАНЬ¹, М. ЦИ¹, М. ПАНЬ¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: czeli1@tpu.ru

В этом исследовании использовалась технология аддитивного производства – технология электронно-лучевой сплавки (ЕВМ) для изготовления деталей из титанового сплава VT6sv, который после электронно-лучевой сплавки соответствует составу Ti-4Al-3V. Были исследованы с помощью оптического микроскопа и твердомера фазовый состав, микротвердость деталей из титановых сплавов Ti-4Al-3V, которые термообработаны при различных температурных условиях. Результаты экспериментов показали, что микроструктура образца, полученного методом ЕВМ, в основном состоит из пластинчатой α фазы и небольшого количества фазы β -Ti с объемноцентрированной кубической структурой (ОЦК), и ее состав неоднороден. А после термообработки в области α фазы ширина зерна увеличилась. При более высоких температурах это явление еще более выражено. Температурный режим существенно воздействует на механические свойства и фазовый состав сплава Ti-4Al-3V, полученного методом аддитивного производства.

Титановые сплавы в настоящее время всё шире разрабатываются и используются в гражданских отраслях, таких как биомедицинская область, оптическая индустрия, ювелирные изделия, мобильные телефоны и компьютеры, и каждый год их количество растет с определенной скоростью. Всё это связано с хорошей биосовместимостью, высокой удельной прочностью, низкой плотностью и другим преимуществам титанового сплава. Во всех перечисленных областях применения титановых сплавов проявляется повышенный интерес к аддитивным технологиям. При этом эффективность использования аддитивных технологий связано с получением титанового сплава высокого качества при хорошей производительности процесса печати. Всё это можно реализовать в условиях аддитивного производства ЕВМ, осуществляемого в вакуумной камере при высоких температурах, близких к 700°C, что снижает остаточные напряжения из-за температурных градиентов и локальных скоростей охлаждения и при использовании печати проволокой [1, 3]

В настоящее время, как показывают исследования, материалам, полученным с помощью аддитивного производства, требуется последующая термическая обработка для повышения механических свойств. Целью этих термомеханических обработок является управления микроструктурой для получения желаемого сочетания статических и механических свойств.

В данном исследовании образцы были напечатаны методом электронно-лучевой сплавки с использованием сварочной проволоки VT6sv [3], механические свойства и химических составов этой проволоки соответствуют ГОСТ 27265-87 [4]

Измерения микротвердости исследуемых образцов проводили с помощью твердомера Durascan-10 G5 после тонкой шлифовки и полировки. нагрузка – 1 кг, время непрерывного нагружения – 3 секунды. Образцы травилась смесью 2% плавиковой кислоты HF, 10% азотной кислоты HNO₃ и дистиллированной воды. Металлографические исследования образцов проводили на оптическом микроскопе «Axio Observer A1m». Механические характеристики при растяжении получены на испытательной машине ГОСТ МИМ.4, в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84, образцы вырезаны на электроэрозионной машине, размеры образца 34 мм x 3 мм x 2 мм.

Термическая обработка выполнена на следующий режим (таблица 1).

Таблице 1 – Режимы термической обработки

Температура, °С	350	450	550	650	750	850	950	1010
Время выдержки, h	1	1	1	1	1	1	1	1
Способ охлаждения	*	*	*	*	*	*	*	*

*: охлаждение на воздухе

При оптической микроскопии образцов, полученных методом аддитивного производства ЕВМ, были обнаружены изначальные крупные столбчатые зерна β -фазы и пластинчатые вторичные α_s -фазы. В процессе термической обработки наблюдалась перераспределение легирующих элементов Al и V по диффузионному механизму. При этом изменялись размеры пластинчатых слоев вторичной α_s -фазы. С увеличением температуры термообработки происходит увеличение ширины α_s -зерен, границы зерна становятся виднее, и размер первичной β -фазы уменьшился. На рисунке 1 представлено влияние термообработки на механические свойства сплава Ti-4Al-3V.

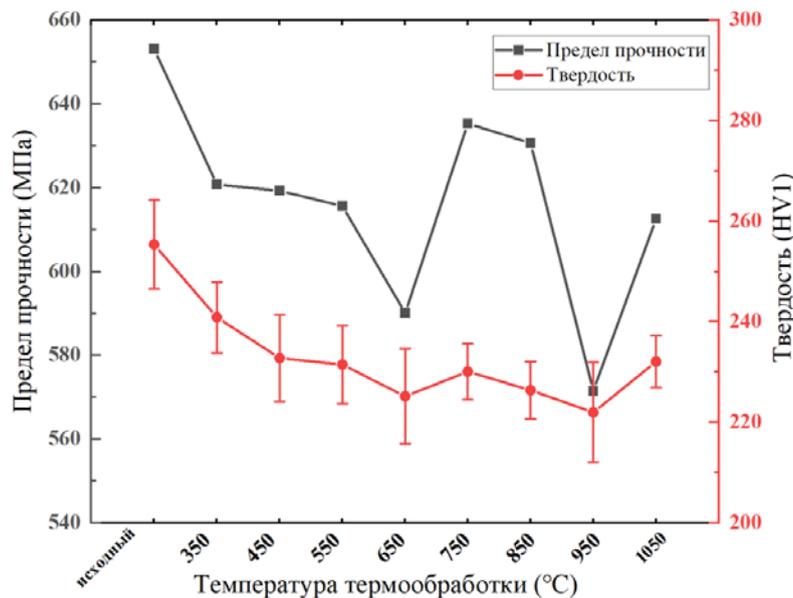


Рисунок 1. Механические свойства сплава Ti-4Al-3V после термообработки

Анализ представленных результатов показывает, что с повышением температуры термообработки прочность на разрыв и твердость демонстрируют флуктуации, не являясь монотонно возрастающими или убывающими функциями. В некоторых температурных диапазонах оба показателя достигают пиковых значений, в то время как в других наблюдается снижение.

При этом установлено, что можно выделить наличие определенной корреляции между прочностью на разрыв и твердостью, которая заключается в том, что при высоких значениях прочности на разрыв, как правило, наблюдаются и высокие значения твердости. Однако эта связь не является строго линейной, и в отдельных областях наблюдаются отклонения.

При низкой термической обработке приводит к снижению уровня остаточных напряжений, соответственно уменьшается дислокация в материале, и твердость снижается. Исследования показали, что твердость термообработанных образцов определяется балансом между α - и β -фазами при температуре обработки, составом этих фаз и распадом мартенсита при закалке

[5, 6]. Методом медленного охлаждения (охлаждение в печи) можно сформировать упорядоченную структуру, имеющую более высокую прочность и твердость при комнатной температуре, но меньшую пластичность [7, 8]. Мартенситные фазы α' и α'' в титановом сплаве с двухфазной структурой считаются промежуточными фазами и в процессе отжига (отпуска) превращаются в пластинчатую микроструктуру $\alpha+\beta$, придавая ему высокие механические свойства [9, 10]

Исследовано воздействие термообработки на микроструктуру и механические характеристики титанового сплава Ti-4Al-3V, полученного аддитивной технологии EBM. Микроструктура данного сплава характеризуется преимущественным присутствием α -фазы и ограниченным объемом β -фазы.

Термическая обработка оказывает воздействие на механические свойства как прочность и твердость сплава Ti-4Al-3V, полученного методом аддитивного производства. С повышением термической температуры происходит начальное снижение твердости, а затем повышается, но не получилось упрочнить данного материал при заданном термическом условии, требуется дальнейшее исследование. Например, увеличить время выдержки в печи. Эти результаты важны для более глубокого понимания структурно-механических взаимосвязей в титановых сплавах, произведенных методом аддитивного производства, и могут быть полезны для дальнейшего совершенствования технологических процессов изготовления и применения таких сплавов в современных инженерных приложениях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ПИИШ НИР-2024-016.

Список литературы

1. Kiel-Jamrozik. M., Jamrozik. W., Witkowska. I. In Innovations in Biomedical Engineering // Springer. – 2013. – 319 с.
2. Kumar, Аноор и др. Influences of Temperature of Thermo Mechanical Working on Hardness of Titanium Alloy // Advanced Materials Research. – 2012. – № 585. – С. 381–386.
3. Klimenov V., Kolubaev E., Anatoly K., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., et al. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti-4Al-3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture// Materials. – 2023. – № 16. – С. 3901.
4. ГОСТ 27265-87 проволока сварочная из титана и титановых сплавов, технические условия
5. Vrancken B, Thijs L, Kruth JP, Humbeeck JV. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: microstructure and mechanical properties. // J Alloys Compd. – 2021. – С. 177.
6. Fopiano P.J., Hickey Jr C.F. Comparison of the heat treatment responses of three commercial titanium alloys// J Test Eval. – 1973. – № 1. – С. 514-519.
7. Rocha, S.S.D., Adabo, G.L., Henriques, G.E.P., Nóbilo, M.A.D.A. Vickers Hardness of Cast Commercially Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy Submitted to Heat Treatments // Braz. Dent. J. – 2006. – № 17. – С. 126–129.
8. Semiatin, S.L. An overview of the thermomechanical processing of α/β titanium alloys: Current status and future research opportunities // Metall. Mater. Trans. A. – 2020. – № 51. – С. 2593–2625.
9. Motyka, M. Martensite Formation and Decomposition during Traditional and AM Processing of Two-Phase Titanium Alloys—An Overview // Metals. – 2021. – № 11. – С. 481.
10. Peters, M., Lütjering, G., Ziegler, G. Control of microstructures of ($\alpha+\beta$) titanium alloys // Z. Metallkd. – 1983. – № 74. – С. 274–282.