

УДК 620.720

Л.Д. Кулак, ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук,
Г.Е. Хоменко, ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук,
О.В. Дацкевич, науч. сотрудник,
Н.Н. Кузьменко, ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук,
В.Ю. Пучкова, науч. сотрудник

*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,
ул. Кржижановского 3, г. Киев, Украина, 03680*

E-mail: altifer@ipms.kiev.ua

ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЛИТЫХ СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Ti-Nb-Si ПРИ ЗАКАЛКЕ

Приведены результаты исследования фазово-структурных превращений и изменения микротвердости сплавов системы Ti-Nb-Si в зависимости от содержания Nb (5 ÷ 35 вес. %) при содержании Si (1,2; 1,5 вес.%), как в литом состоянии, так и после нагрева до 950 °С, с последующим охлаждением в воду (закалка). Исследования выполнены с использованием рентгеноструктурного анализа, оптической микроскопии, микротвердомера.

Ключевые слова: сплав системы Ti-Nb-Si, фазово-структурные превращения, микротвердость, закалка.

Введение. Широко используемый в медицине сплав Ti6Al4V ELI, имеющий хорошую коррозионную стойкость, прочность и высокий модуль упругости, имеет, однако, существенный недостаток, связанный с тем, что, как в свободном состоянии, так и в виде оксида V₂O₃, ванадий является токсичным элементом.

Чтобы избежать этого недостатка был разработан ряд новых сплавов на основе Ti с биосовместимыми элементами, такими как Nb, Zr, Ta, Mo и др. [1-4].

Сплавы системы Ti-Nb-X имеют пониженный модуль упругости и повышенную прочность [1, 5] по сравнению со сплавом Ti6Al4V ELI, что является более предпочтительным для применения их в медицине.

Материалы и методы исследований. Настоящая работа была проведена на сплавах системы Ti-Nb-Si с целью изучения изменения их фазового состава и структуры в зависимости от содержания ниобия (5 ÷ 35 вес.%) при содержании кремния (1,2, – 1,5 вес.%). Кремний выбран в качестве легирующего элемента ввиду того, что он является остеоотропным элементом, стимулирующим репаративные процессы, а также, в сочетании с оптимальными режимами термомеханических обработок и оптимальным содержанием ниобия, позволяет получить необходимые механические свойства сплавов.

Для выплавки сплавов системы Ti-Nb-Si использовали электродуговую плавку. В качестве шихтовых материалов были взяты иодидный титан, полупроводниковый кремний (99,99 % Si) и прессованные штабики ниобия марки Н6Ш2. Слитки весом 100 г и диаметром 15 мм были выплавлены на водоохлаждаемом медном поддоне в аргоновой атмосфере с вольфрамовым нерасходуемым электродом. Для обеспечения химической однородности слитки были переплавлены не менее 8 раз, затем порезаны на заготовки размерами Ø15 × 5 мм для измерения твердости и металлографии, а также рентгеноструктурных исследований, как в исходном состоянии, так и после закалки. Режим закалки: нагрев до 950 °С с выдержкой 1 час и последующим охлаждением в воду.

Фазово-структурные превращения и микротвердость исследовались с использованием следующих приборов: рентгеновская установка ДРОН-3М (напряжение – 22 кV, ток – 20 mA, щель на детекторе – 0,25 мм, съемка образцов проводилась в Cu Kα_{1,2} – излучении), оптический микроскоп, твердомер ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Полученные результаты представлены на рисунках 1, 2.

Литой сплав Ti₅Nb_{1,2}Si представляет собой тонкоигольчатый α-Ti и силицид Ti₃Si в виде дисперсных частиц и крупных скоплений (рисунок 1, область 1; 2-а). После отжига и закалки происходит мартенситное превращение α-Ti → α'-Ti (рисунок 1, область 1'), которое, как правило, в титановых сплавах сопровождается увеличением прочностных свойств [6], и образованием второго силицида Ti₅Si₃. Силициды расположены как в теле зерен в виде мелких частиц, так и по границам зерен в виде крупных прослоек, что приводит к увеличению твердости материала (рисунок 1, область 1'; 2-б).

При увеличении содержания Nb до 20 вес.% в литом сплаве часть α-Ti переходит в β-Ti (рисунок 1, область 2), количество силицидов Ti₃Si увеличивается, образуя в теле зерен сетки, что приводит к увеличению твердости (рисунок 1, область 2; 2в, д). После нагрева и закалки (α+β)-Ti переходит в α"-Ti и появляется второй силицид Ti₅Si₃ (рисунок 1, область 2'), что сопровождается снижением прочностных свойств и твердости [6]. Силициды расположены в виде толстых прослоек вдоль границ зерен и больших полей более мелких силицидов в теле зерен (рисунок 2, г).

Увеличение содержания ниобия в литом состоянии выше 20 вес.% активизирует процесс перехода α -Ti \rightarrow β -Ti с почти полным исчезновением α -Ti (рисунок 1, область 3), что приводит к повышению твердости, появлению частиц высокодисперсного силицида Ti_5Si_3 и увеличению размера силицидов Ti_3Si (рисунок 1, область 3; 2 ж).

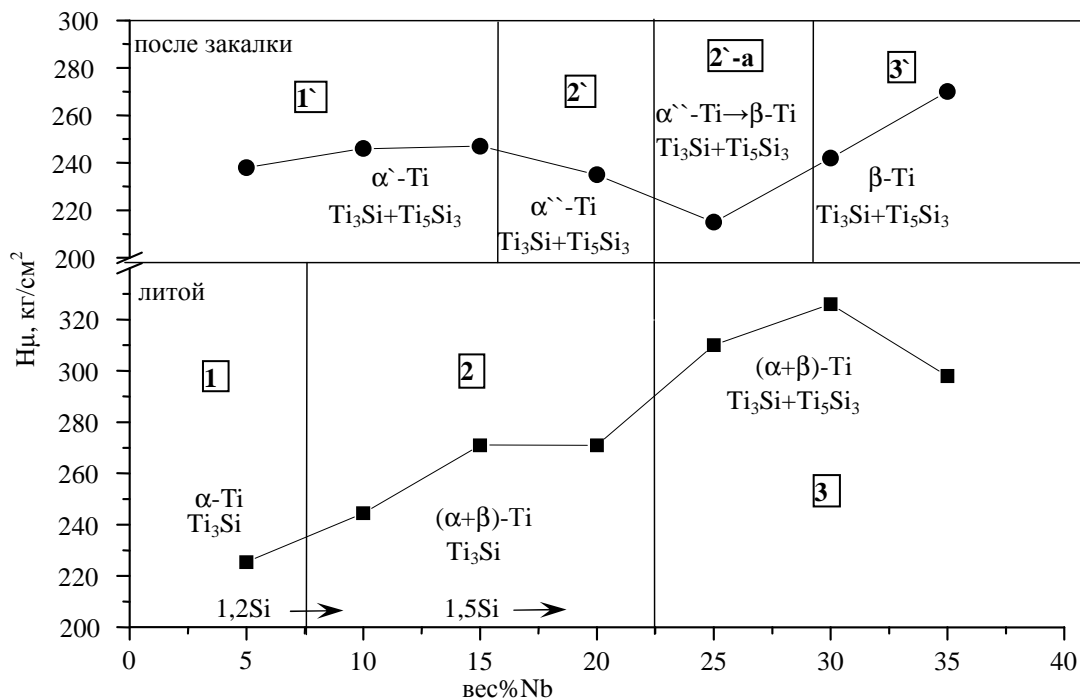


Рисунок 1 – Изменение фазового состава и микротвердости литого и закаленного сплавов системы Ti-Nb-Si в зависимости от содержания Nb при содержании 1,2, 1,5 вес.% Si

После нагрева и закалки при содержании ниобия выше 20 вес.% присутствуют оба силицида и начинается превращение α'' -Ti \rightarrow β -Ti, сопровождающееся снижением твердости (рисунок 1, область 2'-а). С дальнейшим увеличением содержания ниобия до 35 вес.% α'' -Ti полностью переходит в β -Ti, присутствуют оба силицида (рисунок 1, область 3'), которые располагаются как в теле зерна, так и в виде толстых прослоек вдоль границ зерна (рисунок 2, е, з), что приводит к увеличению твердости (рисунок 1, область 3').

Выводы

В литых сплавах системы Ti-Nb-Si при увеличении содержания ниобия до 20 вес.% происходит переход α -Ti \rightarrow $(\alpha + \beta)$ -Ti при наличии силицида Ti_3Si , что сопровождается ростом твердости. При увеличении содержания ниобия выше 20 вес.% появляется второй силицид Ti_5Si_3 , твердость при этом растет до 330 кг/см², а выше 30 вес.% Nb происходит снижение значения твердости, вероятно, за счет практически полного перехода α -Ti в β -Ti.

В сплавах с 5 вес.% Nb после закалки происходит мартенситное превращение α -Ti \rightarrow α' -Ti с образованием обоих силицидов Ti_3Si и Ti_5Si_3 и незначительным повышением твердости. При увеличении содержания ниобия до 20 вес.% α' -Ti превращается в α'' -Ti при наличии обоих силицидов, что сопровождается снижением твердости. Дальнейшее повышение содержания ниобия активизирует переход α'' -Ti \rightarrow β -Ti и при Nb > ~28 вес.% α'' -Ti полностью переходит в β -Ti. При этом увеличивается количество силицидов, располагающихся как в теле зерна, так и по границам зерен, что приводит к увеличению твердости.

Таким образом, увеличение содержания ниобия от 5 до 35 вес.% влияет на трансформацию структуры в зависимости от состояния (литой, закаленный), заключающуюся в переходе от α -Ti через $(\alpha + \beta)$ -Ti, α' -, α'' -Ti в β -Ti при наличии силицидов Ti_3Si и Ti_5Si_3 .

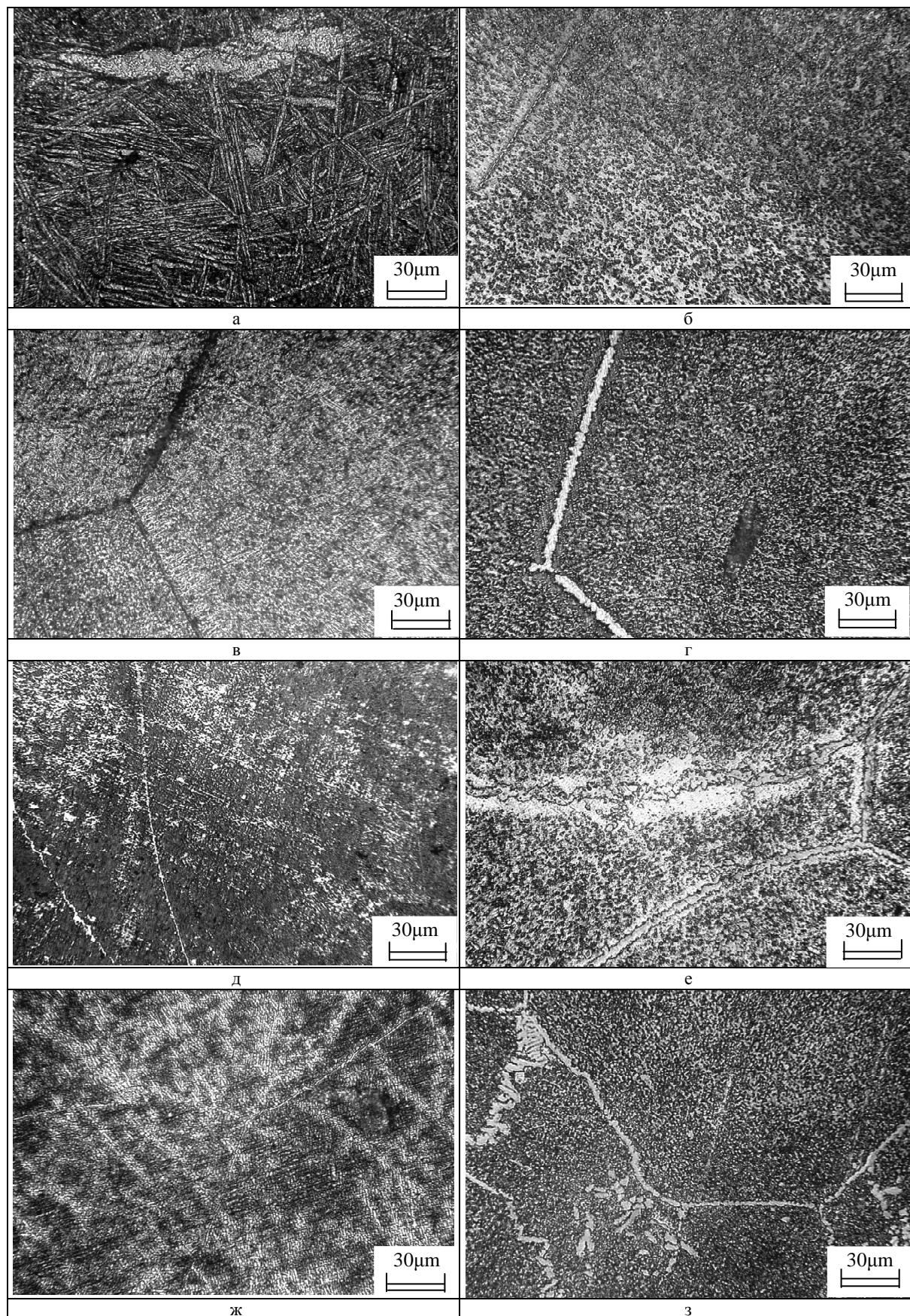


Рисунок 2 – Мікроструктура литого і закаленого сплавів системи Ti-Nb-Si (номера областей показані на рисунку 1): а – область 1; б – область 1'; в – область 2; г – область 2'; д – область 2; е – область 2'-а; ж – область 3; з – область 3'

Библиографический список использованной литературы

1. Cui W.F. High temperature deformation behavior of $\alpha+\beta$ -type biomedical titanium alloy Ti-6Al-7Nb / W.F. Cui, Z. Jin, A.H. Guo // *Materials Science and Engineering A*. — 2009. — V. 499. — P. 252–256.
2. Ho W.F. Structure and properties of cast binary Ti-Mo alloys / W.F. Ho, C.P. Ju, J.H. Lin // *Biomaterials*. — 1999. — V. 20. — P. 2115–2122.
3. Li-juan X.U. Microstructure and dry wear properties of Ti-Nb alloys for dental prostheses / X.U. Li-juan, X.I. Shu-long // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. — 2009. — V. 19. — P. 639–644.
4. Li SJ. Formation and growth of calcium phosphate on the surface of oxidized Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr alloy / J.S. Li, R. Yang, M. Ninomi // *Biomaterials*. — 2004. — V. 25. — P. 2525–2532.
5. Josephine Prabha A. Thermodynamics of $\alpha''\rightarrow\beta$ phase transformation and heat capacity measurements in Ti-15 at % Nb alloy / A. Josephine Prabha, S. Raju, B. Jeyaganesh // *Physica B: Condensed Matter*. — 2011. — V. 406, № 22. — P. 4200–4209.
6. Солонина О.П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. — М.: Наука, 1976. — 448 с.

Поступила в редакцию 13.02.2012 г.

Кулак Л.Д., Хоменко Г.Є., Дацкевич О.В., Кузьменко М.М., Пучкова В.Ю. Фазові і структурні перетворення у литих сплавах системи Ti-Nb-Si при загартуванні

Наведено результати дослідження фазово-структурних перетворень і зміни мікротвердості сплавів системи Ti-Nb-Si в залежності від вмісту Nb (5 ÷ 35 ваг.%) при вмісті Si (1,2, 1,5 ваг.%) як в литому стані, так і після нагріву до 950 °С з наступним охолодженням у воду (загартування). Дослідження виконані з використанням рентгеноструктурного аналізу, оптичної мікроскопії, мікротвердоміру.

Ключові слова: сплав системи Ti-Nb-Si, фазово-структурні перетворення, мікротвердість, загартування.

Kulak L.D., Khomenko G.E., Datskevich O.V., Kuzmenko N.N., Puchkova V.Y. Phase and structural transformations in cast alloys of Ti-Nb-Si system after quenching

The results of the investigation of phase-structural transformation and micro hardness changes of Ti-Nb-Si alloys system, depending on the content of Nb (5 ÷ 35 wt.%) and Si (1,2, 1,5 wt.%) in casting and after heating to 950 °C followed by cooling in water (quenching) were carried out. The studies were made using X-ray diffraction, optical microscopy, microhardness.

Keywords: Ti-Nb-Si alloy, the phase-structural transformation, microhardness, quenching.