

## Температурная зависимость параметров структуры и механических свойств сплава Ti–45Nb в ультрамелкозернистом состоянии\*

А.Ю. Ерошенко<sup>1</sup>, Ю.П. Шаркеев<sup>1,2</sup>, И.А. Глухов<sup>1</sup>,  
М.А. Химич<sup>1</sup>, П.В. Уваркин<sup>1</sup>, А.И. Толмачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Изучена зависимость механических свойств и особенностей структуры ультрамелкозернистого (УМЗ) сплава Ti – 45 мас.% Nb от режимов термообработки. В ходе выполненных экспериментов установлены этапы эволюции УМЗ-структуры исследуемого сплава. Показано, что отжиги в температурном интервале от 400 до 800 °С влекут за собой существенные изменения состояния структуры. Исходная УМЗ-структура характеризуется зернами основной  $\beta$ -фазы, выделениями  $\alpha$ -фазы и наноразмерными частицами  $\omega$ -фазы, обеспечивающими дисперсионное упрочнение сплава. Показано, что термообработка при 400 и 500 °С приводит к увеличению содержания  $\alpha$ -фазы в сплаве. Дальнейшее увеличение температуры до 600 °С приводит к ее частичному растворению. Отмечено, что отжиг при 500 °С характеризуется переходом структуры из УМЗ-состояния в мелкозернистое и крупнокристаллическое с формированием дисперсно-упрочненных зерен  $\beta$ -фазы, а при увеличении температуры происходит разупрочнение исследуемого сплава, что объясняется рекристаллизацией структуры, фазовым превращением, присутствием выделений  $\alpha$ - и  $\omega$ -фаз, а также уменьшением их вклада в дисперсионное упрочнение.

**Ключевые слова:** сплав Ti – 45 мас.% Nb, термическая обработка, ультрамелкозернистая микроструктура, механические свойства, термическая стабильность.

### Введение

Как известно, наиболее широко применяемыми металлами для создания медицинских имплантатов являются биоинертные титан, ниобий, цирконий, гафний, тантал, относящиеся к вентильной группе [1]. Их ключевыми преимуществами, в сравнении с другими материалами на металлической основе, являются хорошая биосовместимость, повышенное сопротивление коррозии, слабое температурное расширение, невыраженная токсичность и сравнительно малая плотность. Самые распространенные в области производства медицинских имплантатов сплавы к настоящему моменту – сплавы на основе титана: Ti–6Al–4V, Ti–6Al–7Nb, Ti–6Al–2.5Fe и др. Однако известно, что наличие в их составе алюминия, ванадия, молибдена и других токсичных элементов является нежелательным [2, 3]. В связи с этим на сегодняшний день отмечен повышенный интерес к бинарным сплавам системы титан – ниобий ввиду отсутствия в их составе токсичных элементов. Интенсивное внимание к данным сплавам, среди которых особо следует отметить Ti–40Nb и Ti–45Nb, обусловлено их высокими биосовместимостью и коррозионной стойкостью, а также пониженными значениями модуля Юнга [4, 5]. Известно, что сплавы титана относятся к сплавам средней прочности. Их модуль Юнга обычно составляет 100–120 ГПа, что существенно выше упругости человеческой кости. В то же время в сплавах на основе титана, в составе которых присутствует 40–45 мас.% ниобия, наблюдаются значения модуля Юнга в 55–60 ГПа. Такое поведение обусловлено стабилизированной высокотемпературной  $\beta$ -фазой (ОЦК-решетка) в составе сплава, которая существенно снижает упругость материала имплантата и делает ее численно сопоставимой с упругостью кортикальной кости (10–30 ГПа) [6]. Однако прочность сплавов Ti–40Nb и Ti–45Nb является недостаточной для применения в области производства медицинских имплантатов без дополнительных воздействий [7]. Интенсивная пластическая деформация (ИПД), являющаяся одним из широко распространенных видов деформационных обработок материалов, позволяет решить вышеобозначенную проблему [8]. Формирование ультрамелкозернистого (УМЗ) или наноструктурного (НС) состояния существенно улучшает механические свойства сплава, подвергнутого обработке, в частности, заметно повышает его прочность. Однако процессы, происходящие в сплавах с полученным УМЗ- и НС-состоянием при различных термических воздействиях, остаются не до

\* Работа выполнена в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Новые материалы специального назначения», соглашение о предоставлении субсидии № 075-15-2025-589 от 25.06.2025 г.