

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАЗНОНАПРАВЛЕННОЙ ОБРАБОТКЕ Nb-Ti-СПЛАВА

В.М. Ажажа, О.В. Чёрный, Г.Е. Сторожилев, Н.Ф. Андриевская, Т.Ю. Рудычева

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
г. Харьков, Украина*

Рассмотрено деформирование Nb-Ti-сплава по схеме “осадка-выдавливание” при повышенных температурах с последующим отжигом. Такая комбинированная обработка способствует формированию однородной дисперсной структуры. Исследованы механические свойства сплава Nb-Ti и показано, что пластические характеристики увеличиваются по сравнению с литым состоянием.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных материалов, широко используемых при изготовлении высокотокковых сверхпроводящих устройств, являются деформируемые ниобий-титановые сплавы [1,2]. В процессе получения многожильных Nb-Ti сверхпроводников возникают дефекты различного происхождения, которые могут снижать характеристики пластичности сплава.

Для повышения пластичности материалов применяют традиционные методы обработки слитков, например, ротационную ковку с последующим высокотемпературным отжигом [3]. Для повышения ресурса пластичности также используют знакопеременную деформацию [4]. Такая обработка активизирует дополнительные системы скольжения и двойникования, существенно повышает структурную однородность. Разнонаправленная деформация (РНД) совместно с температурной обработкой способствует формированию однородной субзеренной структуры, свободной от дислокаций внутри них. При интенсивной пластической деформации разориентация субзерен увеличивается, и образуется мелкокристаллическая зеренная структура.

Целью данной работы явился анализ напряжённо-деформированного состояния при выбранной схеме обработки, а также изучение влияния разнонаправленной деформации на структуру и механические свойства Nb-Ti-сплава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниобий-титановый сплав (НТ-50) был получен методом дуговой вакуумной гарниссажной плавки (ДВГП-2). Исходными компонентами сплава являлись: титан губчатый марки ТГ-105 и ниобий электронно-лучевой плавки НЭ-2.

Из исходного крупнозернистого слитка вырезали цилиндрические заготовки диаметром 20 мм и высотой 60 мм и помещали в медную оболочку для предохранения сплава от атмосферного воздействия при повышенных температурах. Образцы деформировали осадкой и выдавливанием при температурах 20...800°C со степенью деформации 52, 88 и 98 % при различных сочетаниях температуры и деформации. Последующую термообработку проводили

ли в вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм рт. ст.) при температурах 400...800°C в течение 1...50 ч.

После прессования сплава изготавливали цилиндрические образцы для испытаний на растяжение с отношением рабочей длины к диаметру равным 5. Испытания механических свойств: предела прочности (σ_b), предела текучести ($\sigma_{0.2}$), относительного удлинения (δ) и поперечного сужения (ψ), проводили при комнатной температуре на разрывной машине со скоростью перемещения захватов 2 мм/мин.

Металлографические исследования проводили на микроскопе МИМ-8М. Дислокационную структуру изучали на тонких фольгах методом трансмиссионной электронной микроскопии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения многоволоконных Nb-Ti сверхпроводников с повышенными токовыми и механическими характеристиками необходимо в исходном материале создать более однородную субзеренную структуру. Для этого нами был разработан способ РНД слитков Nb-Ti-сплава. Этот метод, состоящий из чередования деформационных обработок слитка вначале осадкой в замкнутом контейнере, а затем выдавливанием из этого контейнера. Такая многоцикловая обработка позволяет проводить интенсивное разнонаправленное деформирование материала вплоть до исчерпания его ресурса пластичности.

Проанализируем схемы напряжённо-деформированного состояния материала при такой комбинированной обработке. Вначале при свободной осадке в средней части слитка происходит бочкообразование. Здесь деформация довольно однородная, поскольку выполняется принцип Сен-Венана, согласно которому в точках, удалённых от места приложенной нагрузки, влияние перераспределения усилий столь мало, что им можно пренебречь. В непосредственной близости к прилагаемой нагрузке деформирование в существенной мере зависит от контактного трения. Естественно для создания более однородного напряжённо-деформированного состояния трение следует уменьшать. Для примера на рис. 1,а приведена схема деформации образца при свободной осадке. Использование обработки осадкой в замкнутом контейнере также способствует большей равномерности деформирования материала.

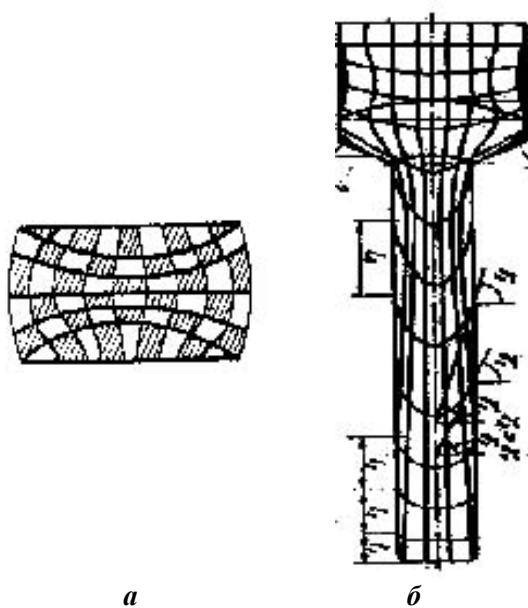
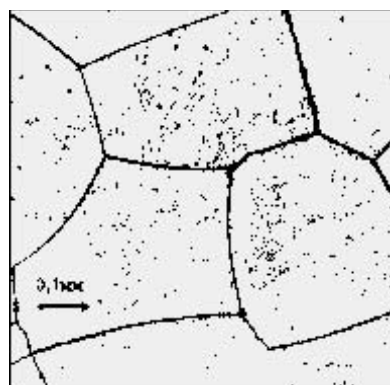


Рис. 1. Неравномерность деформации при осадке (а) и выдавливании (б) слитков

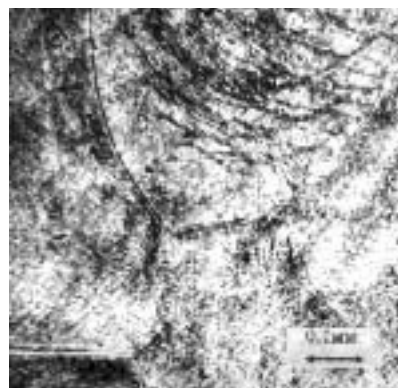
При обычном выдавливании сплава из контейнера, схема деформации которого приведена на рис. 1,б, материал характеризуется неравномерностью структуры по сечению и длине образца, обусловленной неравномерностью деформации.

Металлографический анализ показал, что после предварительного деформирования материала осадкой и последующим выдавливанием микроструктура материала становится более однородной, причём в большей степени с увеличением циклов обработки (рис. 2). Если в исходном слитке (см. рис. 2,а) видна довольно крупнозернистая структура с размером зёрен вплоть до 1 мм, то уже после однократного цикла деформации форма зёрен искажается, в них появляются линии течения (см. рис. 2,б). После трёхциклового обработки зёрна в продольном сечении становятся вытянутыми, возникает текстура деформации (см. рис. 2,в). В поперечном сечении форма зёрен изменяется в меньшей степени (см. рис. 2,г), причём линии течения формируют структуру, подобную структуре булатной стали.

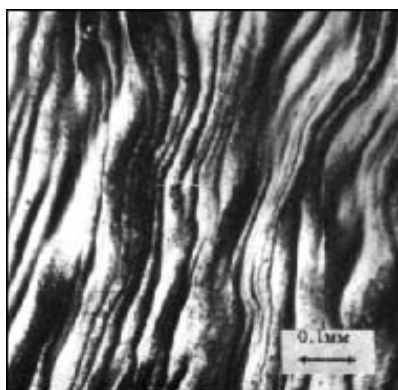
Таким образом, чем выше степень пластической деформации исследуемого сплава, тем более однородную структуру выявляет металлографический анализ. Это также подтверждается результатами ультразвуковой дефектоскопии. Так, после трёхциклового обработки на дефектограммах отсутствуют пики, обусловленные дефектностью структуры в слитке. Следствием высокого структурного качества обработанного материала также является снижение степени шероховатости на поверхности раздела композита Nb-Ti (рис. 3).



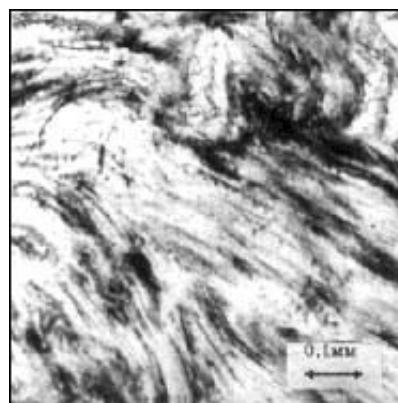
а



б



в



г

Рис.2 Микроструктура сплава Nb-50 вес % Ti:
а - исходный слиток, б - после однократной РНД (поперечное сечение), в - и г после трёхкратной РНД (продольное и поперечное сечение)

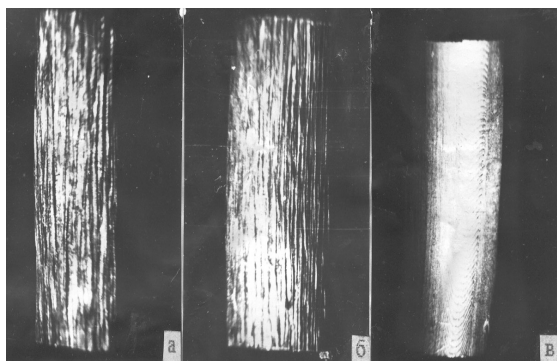


Рис.3. Поверхность Nb-Ti-стержня после стравливания медной оболочки: а - выдавливание, вытяжка $\mu=9$; б - 1-цикловая обработка, $\mu=20$; в - 5-цикловая обработка, $\mu=1,3 \cdot 10^4$

Результаты испытаний механических характеристик ниобий-титанового сплава на различных стадиях деформационной обработки показаны в таблице. Для сравнения в этой таблице также приведены механические характеристики контрольного слитка после его обработки стандартным методом. Как видно из таблицы, РНД приводит к повышению прочностных и пластических характеристик сплава. Поперечное сужение растёт с увеличением количества циклов обработки. Основной прирост ψ уже наблюдается после одноциклового обработки. Максимум $\psi \sim$

87,5 % достигнут после 3-х циклов обработки. Заметим, что при последующем волочении биметаллического прутка характеристики пластичности выше у материала после РНД. Так, на прутке диаметром 10 мм величина ψ достигает $\sim 80\%$ по сравнению с 71 % по обычной технологии.

На рис. 4 приведен внешний вид испытанных на растяжение образцов. С увеличением количества циклов обработки величина относительного сужения растёт (см. рис. 4,б).

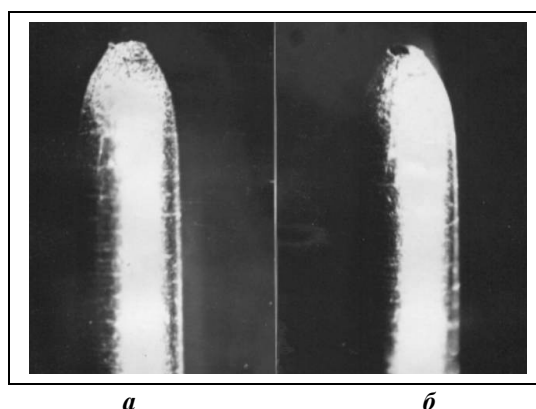


Рис.4. Образцы, испытанные на растяжение: а - 1-цикловая обработка; б - 5-цикловая обработка

Механические характеристики Nb-Ti-слитков в зависимости от количества циклов РНД

Номер опыта	Режимы РНД	σ_b , кг/мм ²		$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²		ψ , %	
		D = 80 мм	d = 10 мм	D = 80 мм	d = 10 мм	D = 80 мм	d = 10 мм
1	Контр.	40,1	48,0	35,9	42,6	51,1	71,6
2	1 цикл	44,4	48,8	39,2	43,5	78,6	76,7
3	2 цикла	45,0	49,4	40,2	44,1	83,7	79,0
4	3 цикла	46,2	50,0	41,3	45,0	87,5	80,0

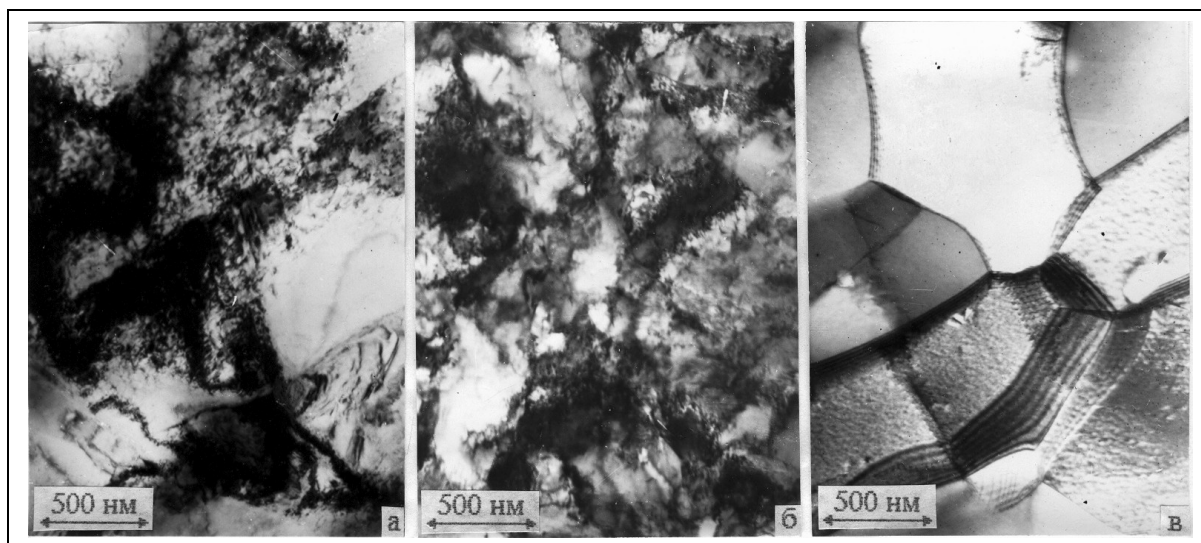


Рис.5. Дислокационная структура Nb-Ti сплава после разнонаправленной деформации: а - выдавливание (98 %), $T=650^\circ\text{C}$ + осадка (52 %), $T=20^\circ\text{C}$; б - осадка (52 %), $T=650^\circ\text{C}$ + выдавливание (88 %), $T=650^\circ\text{C}$; в - выдавливание (98 %), $T=650^\circ\text{C}$ + осадка (52 %), $T=650^\circ\text{C}$ + отжиг $T=650^\circ\text{C}$, 1 ч

Электронно-микроскопический анализ показал, что разнонаправленное деформирование сплава в интервале температур 20...200°C формирует слабо-выраженную ячеистую структуру с широкими стенками и высокой плотностью дислокаций внутри ячеек (до $\sim 10^{11}$ 1/см²) (рис. 5,а). С повышением температуры обработки вплоть до 650°C формируется развитая субзёрненная структура размером $\sim 0,3$ мкм (см. рис. 5,б). При РНД сплава поле внутри субзёрен значительно чище. Так, после выдавливания при 650°C и отжиге (650°C, 1 ч) плотность дислокаций внутри субзёрен $\sim 5 \cdot 10^{10}$ 1/см², а после одноцикло-вой обработки плотность дислокаций снизилась до $\sim 10^{10}$ 1/см² (см. рис. 5,в). После 1-часового отжига при температуре 650°C размер субзёрен в РНД слитке составляет $\sim 0,3 \dots 0,5$ мкм. С увеличением длительности отжига субструктура укрупняется до тех пор, пока не образуется зёрненная структура с большеугловыми границами. Плотность дислокаций в зёрнах после 50-часового отжига понижается до $\sim 10^9$ 1/см².

ВЫВОДЫ

1. Разнонаправленная деформация слитков сплава НТ-50 формирует в материале однородную высо-

кодисперсную субзёрненную структуру размером 300...500 нм.

2. Показано, что с увеличением числа циклов обработки размер субзёрненной структуры ниобий-титанового сплава понижается.

3. После разнонаправленной обработки слитков прочностные характеристики сплава НТ-50 растут на ~ 15 %, а пластические – на ~ 70 % по сравнению с исходным слитком.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Фонер, Б. Шварц. *Металловедение и технология сверхпроводящих материалов*. М.: “Металлургия”, 1987.
2. В. Буккель. *Сверхпроводимость*. М.: “Мир”, 1975.
3. Т.Е. Cordier, W.K. McDonald. Получение и пресование слитков Nb-Ti весом 2500 фунтов // *IEEE Trans. on Magn.* 1975, v. MAG-11, № 2, p.280.
4. И.И. Папилов, И.А. Тараненко, Г.Ф. Тихинский. Получение и свойства мелкозернистого бериллия // *Атомная энергия*. 1974, т. 37, №3, с.220.

ВИВЧЕННЯ ДЕФОРМІРОВАНОГО СТАНУ ПРИ РІЗНОНАПРАВЛЕНОЇ ОБРОБЦІ Nb-Ti-СПЛАВУ

В.М. Ажажа, О.В. Чорний, Г.Є. Сторожілов, Н.Ф. Андрієвська, Т.Ю. Рудичева

Розглянуто деформування Nb-Ti-сплаву за схемою “осаджування-видавлювання” при підвищених температурах з наступним відпалюванням. Така комбінована обробка сприяє формуванню однорідної дисперсної структури. Досліджено механічні властивості сплаву Nb-Ti і показано, що пластичні характеристики збільшуються в порівнянні з литим станом.

STRAINED STATE OF Nb-Ti ALLOY AFTER MULTIDIRECTIONAL TREATMENT

V.M. Azhazha, O.V. Chernyi, G.E. Storozhilov, N.F. Andrievskaya, T.Yu. Rudicheva

The straining of Nb-Ti alloy by the scheme “compression-extrusion” at in elevated temperatures with subsequent annealing. Such a combined treatment is favorable for forming the homogeneous disperse structure. We investigates the mechanical properties of Nb-Ti alloy and determined that plastic characteristics are increased.