

**ВЛИЯНИЕ БОРА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА В СПЛАВАХ НА
ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

К.А. Реунова

Научные руководители: гл.н.с., д.ф.-м.н., И.В. Киреева, профессор, д.ф.-м.н. Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: reunova.ksenya@mail.ru

**THE EFFECT OF BORON ON MECHANICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES IN THE IRON-
BASED ALLOY**

K.A. Reunova

Scientific Supervisors: leading researcher, Dr., I.V. Kireeva, professor, Dr. Yu.I. Chumlyakov

National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenina str., 36, 634050

E-mail: reunova.ksenya@mail.ru

Abstract. *The mechanical properties and superelastic behavior were studied on [001]-single crystals of Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5% X (at. %) (X=Ta, TaB) alloy. It is shown that boron affects on the mechanical and functional properties in the iron-based alloy.*

Введение. Известно, что сплавы на основе железа испытывают термоупругое γ - α' (γ -ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка, α' -ОЦТ – объемноцентрированная тетрагональная решетка) мартенситное превращение (МП) при выделении в процессе старения наноразмерных дисперсных частиц γ' -фазы атомноупорядоченной по типу $L1_2$ размером $d=3-30$ нм [1]. Частицы γ' -фазы повышают уровень прочностных свойств высокотемпературной фазы, увеличивают тетрагональность α' - мартенсита, уменьшают величину термического гистерезиса, и приводят к смене механизма деформации инвариантной решетки от скольжения к двойникованию. Для того чтобы такие сплавы могли активно использоваться, необходимы систематические исследования на монокристаллах этих сплавов различных составов [2]. Поэтому цель настоящей работы является изучение влияния бора концентрацией 0,05 ат. % на механические и функциональные свойства, на температуры МП в монокристаллах, где бор выделяется в теле зерна, в отличие от поликристаллов, где бор выделяется по границам зерен и используется для подавления образования β -фазы.

Материалы и методы исследования. Монокристаллы сплавов Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5% X (ат. %) (X=Ta, TaB) выращивали методом Бриджмена в атмосфере гелия. Для исследования были выбраны монокристаллы, ориентированные вдоль [001]-направления, так как именно в этом направлении при растяжении достигается максимальная теоретическая величина деформации решетки $\epsilon_0[001]=8,7$ % при γ - α' МП. Исследование температурной зависимости осевых напряжений и величины СЭ изучали на кристаллах после старения при $T=973$ К в течение 30 минут на испытательной машине Instron-5969.

Результаты. Экспериментально установлено, что после старения при $T=973$ К в течение 30 минут в монокристаллах Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5% X (ат. %) (X=Ta, TaB) выделяются частицы γ' -фазы размером $d<3-5$ нм. Исследование зависимости $\rho(T)$ после старения при $T=973$ К в течение 30 минут не

обнаруживает в температурном интервале переходов связанных с МП. Для того чтобы установить, что в данных сплавах реализуется МП проводили исследования температурной зависимости осевых напряжений $\sigma_{0,1}(T)$ при деформации растяжением.

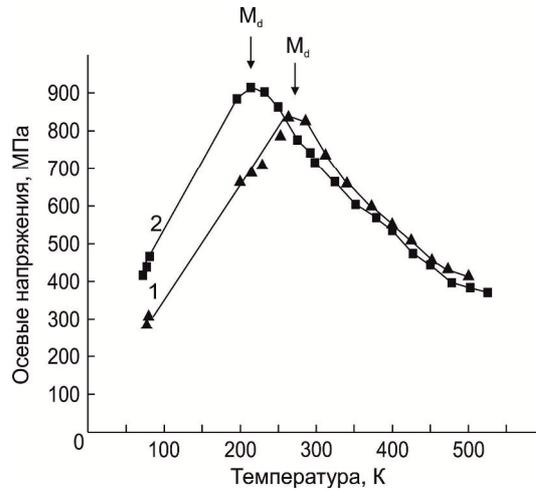


Рис.1 Температурная зависимость осевых напряжений $\sigma_{0,1}(T)$ для [001]-ориентации монокристаллов сплава: 1 – Та , 2 – ТаВ, состаренных при $T=973$ К в течение 30 минут при деформации растяжением

Из рис.1 видно, что данная зависимость имеет вид типичный для сплавов испытывающих МП под нагрузкой, на ней можно выделить две стадии. Первая стадия от $77 \text{ K} < T < M_d$, где напряжения $\sigma_{0,1}$ возрастают с увеличением температуры испытания, описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{d\sigma_{0,1}}{dT} = -\frac{\Delta H}{\varepsilon_0 T_0}, \quad (1)$$

здесь ΔH – изменение энтальпии при γ - α' МП; ε_0 – деформация решетки, которая зависит от ориентации кристалла; T_0 – температура химического равновесия γ - и α' - фаз. Вторая стадия при температуре выше M_d сопровождается уменьшением $\sigma_{0,1}(T)$ и связана с пластической деформацией высокотемпературной фазы, характеризуется нормальной температурной зависимостью предела текучести типичной для ГЦК материалов.

Таблица 1

Функциональные и механические свойства монокристаллов сплава Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5% X (ат. %) (X=Та, ТаВ), состаренных при $T=973$ К в течение 30 минут, при деформации растяжением

Сплав	$T(M_d)$, К	$\sigma_{0,1}(M_d)$, МПа	$\alpha=d\sigma_{0,1}/dT$, МПа/К	ε_0 , %	$\varepsilon_{сз}$, %
Та	270	840	2,5	8,7	9,2
ТаВ	214	910	2,5	8,7	7,4

Анализ данных, представленных на рис.1 и в таблице 1 показывает, во-первых, при $T=77$ К напряжения в сплаве с Та оказались на 130 МПа ниже, чем в сплаве ТаВ, следовательно легирование бором понижает температуру M_s . Во-вторых, бор не оказывает влияние на величину $\alpha=d\sigma_{0,1}/dT$. И, в третьих, легирование бором концентрацией 0,05 ат. % не приводит к упрочнению высокотемпературной фазы.

Доказательством того, что в исследуемых кристаллах реализуется термоупругое МП, является проявление СЭ. На рис.2 показаны результаты по циклированию СЭ при температуре 77 К для монокристаллов сплава Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5% X (ат. %) (X=Ta, TaV).

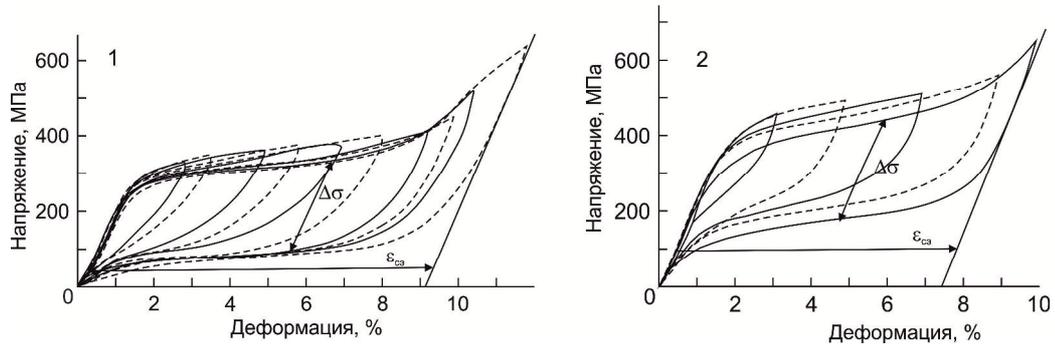


Рис.2 Сверхэластичность при $T=77$ К для $[001]$ -ориентации монокристаллов сплава: 1 – Ta и 2 – TaV, состаренных при $T=973$ К в течение 30 минут при деформации растяжением

Видно, что в кристалле с Ta величина $\epsilon_{сэ}=9,2\%$, и по величине превышает теоретическую величину деформации решетки $\epsilon_0=8,7\%$ для данной ориентации. Это связано с развитием упругого двойникования по (110)-плоскостям в α' -мартенсите [3]. Петля СЭ характеризуется широким механическим гистерезисом $\Delta\sigma=260$ МПа. В кристаллах TaV величина $\epsilon_{сэ}=7,4\%$ оказывается меньше теоретического значения деформации решетки, что связано с более высокими $\sigma_{0,1}$ при $T=77$ К по сравнению с Ta.

Заключение. Таким образом, экспериментально установлено, что в $[001]$ -монокристаллах сплавов Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5% X (ат. %) (X=Ta, TaV) при деформации растяжением, легирование бором приводит к понижению температуры M_s , не изменяет величину $\alpha=d\sigma_{0,1}/dT$, не влияет на повышение прочностных свойств исходной фазы и не подавляет СЭ.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокорин В.В. Мартенситные превращения в неоднородных твердых растворах. – Киев: Наука думка, 1987. – 168 с.
2. Чумляков Ю. И., Киреева И. В., Куц О. А., Платонова Ю. Н., Поклонов В. В., Куксгаузен И. В., Куксгаузен Д. А., Панченко М. Ю., Реунова К. А. Термоупругие мартенситные превращения в монокристаллах сплавов FeNiCoAlX(B) // Известия Вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 11. – С. 61–68.
3. Chumlyakov, Y. I., Kireeva, I. V. (2016) Unusual reversible twinning modes and giant superelastic strains in FeNiCoAlNb single crystals // Scripta Materialia. V. 119, pp. 43–46.