ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/207

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ РАЗВИТИИ R-B19' МП В СОСТАРЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА $\text{Ni}_{50,6}\text{Ti}_{49,4}$

Суриков Н.Ю., Тимофеева Е.Е., Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И.

Томский государственный университет, Томск

Работа посвящена выяснению влияния ориентации и морфологии R-мартенсита на закономерности развития B2–R и R–B19' мартенситных превращений (МП) под сжимающей нагрузкой: величину термического гистерезиса и стадийность МП при проявлении эффекта памяти формы (ЭПФ) в состаренных монокристаллах сплава $\text{Ni}_{50,6}\text{Ti}_{49,4}$ (ат. %).

Термическая обработка – отжиг 1253 К, 1 ч + старение 573 К, 1,5 ч выбрана, исходя из следующих соображений. Во-первых, данная обработка приводит к получению широкого температурного интервала, в котором материал находится в R-фазе. Это позволит более подробно изучить зависимость термического гистерезиса при развитии B2-R-B19' МП от ориентации и морфологии R-мартенсита. Во-вторых, выбранный режим старения обеспечивает выделение когерентных наноразмерных частиц Ti_3Ni_4 (< 10 нм), упрочняющих B2-фазу и расширяющих температурный интервал сверхэластичности (СЭ) [1, 2].

В рамках исследования выбраны монокристаллы, ориентированные вдоль [001]- и [112]-направлений. В [001]-монокристаллах при сжатии деформация B2–R МП равна нулю, фактор Шмида для действующих систем скольжения $a<100>\{011\}$ в аустените равен нулю. Таким образом, данная ориентация является высокопрочной и при развитии B2–R–B19' МП под нагрузкой стадий B2-R наблюдаться не должно. Что касается низкопрочной [112]-ориентации, то деформация решетки при B2–R МП составляет 0,2 %, а фактор Шмида для скольжения в аустените составляет 0,47 и близок к максимальному значению [3]. Выбор ориентаций с различной деформацией B2–R МП позволит исследовать влияние морфологии R-мартенсита (самоаккомодирующая структура, ориентированный мартенсит) на закономерности развития B2–R и R-B19' МП.

Электронно-микроскопические исследования микроструктуры состаренных монокристаллов подтверждают наличие дисперсных частиц Ti_3Ni_4 размером < 10 нм, а также, совместно с данными дифференциальной сканирующей калориметрии, существование R-мартенсита в широком температурном интервале (182 – 273 К) [4].

В [001]-ориентации в циклах охлаждение/нагрев при постоянной нагрузке на кривых $\epsilon(T)$ МП идет в одну стадию с максимальной величиной ЭПФ до 3 % и практически без необратимой деформации при напряжениях до 600 МПа (рис 1, а). Стадий, связанных с B2–R МП под нагрузкой, не наблюдается. При напряжениях до 300 МПа реализуется R-B19' МП, термический гистерезис при этом уменьшается в $\sim 3,5$ раза с 65 до 20 К. При напряжениях, выше 300 МПа, реализуется последовательность B2-B19' МП, и термический гистерезис практически не зависит от напряжений (рис. 1, б).

Зависимость термического гистерезиса от уровня приложенных напряжений в [001]-монокристаллах можно объяснить следующими факторами.

Во-первых, высокая прочность B2-фазы [001]-монокристаллов обеспечивает развитие МП при высоких напряжениях и температурах без пластической деформации. Во-вторых, при сжатии вдоль [001]-направления не наблюдается раздвойникового B19'-мартенсита, и плоскость габитуса остается неискаженной вне зависимости от уровня внешних напряжений. В-третьих, с ростом температуры ромбоэдрический угол решетки R-мартенсита приближается к 90° [5]. Поскольку частицы Ti_3Ni_4 выросли в B2-фазе, то при B2–R МП изменение ромбоэдричности R-мартенсита охлаждения приводит к изменению параметра размерного несоответствия между решетками R-мартенсита и частиц Ti_3Ni_4 . С увеличением температуры несоответствие уменьшается, параметры решетки R-фазы приближаются к B2-фазе, и сила сопротивления движению межфазной границы и энергия рассеяния снижаются.

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

Рис. 1. Кривые $\varepsilon(T)$ и соответствующие зависимости термического гистерезиса от уровня приложенных напряжений [001]- (а, б) и [112]- (в, г) монокристаллов сплава $\text{Ni}_{50.6}\text{Ti}_{49.4}$

В [112]-ориентации максимальная величина ЭПФ близка к [001]-монокристаллам и составляет 3,2 %. При напряжениях ниже 400 МПа деформация полностью обратима, и на кривых $\varepsilon(T)$ присутствуют стадии, как связанная с ориентированным ростом R-мартенсита при T_R , так и с R-B19' МП (рис. 1, в). При 400 МПа и выше наблюдаются одностадийные B2-B19' МП под нагрузкой, появляется необратимая деформация, величина которой достигает 1,5 % при 600 МПа. При полностью обратимом МП термический гистерезис, связанный с образованием B19'-мартенсита, слабо зависит от уровня приложенных напряжений и уменьшается с 52 до 47 К. При высоких напряжениях, когда появляется необратимость, гистерезис увеличивается до 61 К (рис. 1, г).

Причины различия зависимости термического гистерезиса в исследуемых ориентациях следующие. Во-первых, в [112]-монокристаллах при малых напряжениях ($\sigma \leq 75$ МПа) термический гистерезис в $\sim 1,5$ раза меньше, чем в свободном состоянии $\Delta T = 67$ К. Это связано с различной морфологией R-мартенсита при развитии R-B19' МП: самоаккомодирующая структура в свободном состоянии, и ориентированный вариант при охлаждении под нагрузкой. Уменьшение числа двойниковых границ в R-мартенсита приводит к уменьшению диссипации энергии при R-B19' МП.

Во-вторых, несмотря на изменение угла α в решетке R-мартенсита, низкие прочностные свойства B2-фазы в [112]-монокристаллах приводят к возникновению микропластической деформации в ходе развития МП. Поэтому термический гистерезис при R-B19' МП под нагрузкой изменяется слабо с ростом напряжений, а при B2-B19' МП и напряжениях выше 350 МПа гистерезис возрастает.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-19-00298.

1. I. Kaya, H. Tobe et al. Shape memory behavior of [111]-oriented NiTi single crystals after stress-assisted aging // *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. – 2016. – V. 29(3). – P. 282–286
2. J.I. Kim, S. Miyazaki. Effect of nano-scaled precipitates on shape memory behavior of Ti-50.9at.%Ni alloy // *Acta Materialia*. – 2005. – V. 53 – P. 4545–4554
3. Xiangyang Zhang, Huseyin Sehitoglu. Crystallography of the B2→R→B19 phase transformations in NiTi. // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – V. 374. – P. 292–302
4. E. E. Timofeeva, E. Yu. Panchenko, N. Yu. Surikov et al. Special features of thermal and stress hysteresis of B2→R→B19' martensitic transformations in aged [001]-oriented Ti–50.6 at.% Ni single crystals // *Russian Physics Journal*. – 2019. – V. 61. – No. 12. – P. 2231–2235
5. Miyazaki, S. Kimura, and K. Otsuka. Shape-memory effect and pseudoelasticity associated with the R-phase transition in Ti-50.5 at.% Ni single crystals // *Philos. Mag. A*. – 1988. – V. 57. – P. 467–478