

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»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/172

ЭФФЕКТЫ ПАМЯТИ ФОРМЫ И СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТИ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ FeNiCOALTi, УПРОЧНЕННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ

¹Чумляков Ю.И., ¹Киреева И.В., ¹Куксгаузен И.В., ¹Поклонов В.В., ¹Победенная З.В.,
¹Бессонова И.Г., ¹Куксгаузен Д.А., ²Niendorf T., ²Krooß P.

¹Томский государственный университет, Сибирский физико-технический институт, Россия

²Institute für Werkstofftechnik, Universität Kassel, Kassel, Germany

Представлены новые экспериментальные результаты исследования влияния размера и объемной доли наноразмерных частиц γ' -фазы, ориентации кристаллов и способа деформации – растяжении/сжатия на развитие термоупругих γ (ГЦК) – α' (ОЦТ) мартенситных превращений (МП) в свободном состоянии и под нагрузкой, эффект памяти формы (ЭПФ), сверхэластичность (СЭ), температурную зависимость напряжений начала МП под нагрузкой и напряжения пластической деформации высокотемпературной фазы в монокристаллах Fe-28Ni-17Co-11.5Al-2.5Ti (ат., %).

При исследовании температурной зависимости электрического сопротивления $\rho(T)$ показано, что старение при 873 К от 0.5 до 32 часов приводит к увеличению температур начала M_s и конца M_f прямого МП и начала A_s и конца A_f обратного МП. Установлены три режима старения, классификация которых проводится по следующим признакам: соотношение температур M_s и A_s и необратимость изменения $\rho(T)$ в цикле «охлаждение-нагрев». Первый тип переходов это ранние стадии старения $t \leq 0.5$ –3 часа при 873 К, которые характеризуются замкнутой петлей $\rho(T)$ и $M_s < A_s$. В соответствии с термодинамическим анализом обратимых МП это означает, что накопленная при превращении упругая свободная энергия Гиббса ΔG_{el} оказывается меньше удвоенного значения рассеянной энергии Гиббса при МП $2\Delta G_{diss}$. В этом классе переходов частицы γ' -фазы, определенные методом электронной микроскопии, имеют размер от 2 до 4 нм. Второй тип переходов, t от 3 до 30 часов, когда $M_s > A_s$ и $\Delta G_{el} \geq 2\Delta G_{diss}$, имеет место при размерах частиц от 4 до 10 нм и кривые $\rho(T)$ при охлаждении/нагреве оказываются замкнутыми и, следовательно, имеет место обратимые γ - α' МП. Третий тип переходов обнаружен при больших временах старения $t > 30$ часов и характеризуется незамкнутой петлей $\rho(T)$, превращение становится необратимым, размер частиц при этом размер частиц γ' -фазы $d > 10$ –15 нм.

Проведено исследование температурной зависимости напряжений начала МП во всех трех типах γ - α' МП. Показано, что при всех размерах частиц наблюдаются две стадии зависимости $\sigma_{0.1}(T)$, характеризующиеся различным знаком и величиной $d\sigma_{0.1}/dT$. В области низких температур установлено близкое к линейному возрастание $\sigma_{0.1}(T)$, которое связано с развитием γ - α' МП под нагрузкой и описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{d\sigma_{0.1}}{dT} = -\frac{\Delta S}{\varepsilon_0} = -\frac{\Delta H}{T_0 \varepsilon_0}, \quad (1)$$

здесь ΔS , ΔH – изменение энтропии и энтальпии при γ - α' превращении, соответственно, ε_0 – деформация превращения, T_0 – температура химического равновесия фаз. Величина $\alpha = d\sigma_{0.1}(T)/dT$ слабо зависит от старения и изменяется от 2.8 до 3.5 МПа/К. Вторая стадия характеризуется уменьшением $\sigma_{0.1}$ с ростом температуры и связана с температурной зависимостью прочностных свойств высокотемпературной фазы. При $T = M_d$, когда имеет место изменение знака зависимости $\sigma_{0.1}(T)$, напряжения для начала МП под нагрузкой $\sigma_{0.1}^{\gamma-\alpha'}$ становятся равными напряжениям пластической деформации высокотемпературной фазы $\sigma_{0.1}^{\gamma}$: $\sigma_{0.1}^{\gamma-\alpha'}(M_d) = \sigma_{0.1}^{\gamma}(M_d)$. Показано, что температура M_d и напряжения в температуре M_d $\sigma_{0.1}(M_d)$ зависят от размера частиц и изменяются от 1000 МПа до 500 МПа при вариации размеров от 2–4 нм до 15–20 нм, соответственно.

Показано, что в [001]- кристаллах при растяжении величина ЭПФ, которая измерялась в дилатометре при охлаждении/нагреве при различном уровне приложенных напряжений от 5 до 550 МПа и СЭ, которая исследовалась в изотермических условиях от $T = 77$ К до $T = M_d$,

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

определяется типом МП и, следовательно, размером частиц. В первом типе МП установлены аномально большие значения СЭ ε_{SE} от 8.7 до 12 %, большие значения механического гистерезиса $\Delta\sigma=300-600$ МПа и ЭПФ ε_{SME} до 8.7 %. Теоретические значения деформации превращения ε_0 при $\gamma-\alpha'$ МП составляют 8.7 % и, следовательно, $\varepsilon_{CЭ}>\varepsilon_0$, $\varepsilon_{ЭПФ}=\varepsilon_0$. СЭ наблюдается при $T>A_f$ и интервал СЭ составляет 50–70 К. Во втором классе превращений впервые установлено, что обратимая деформация равная 3 % наблюдается при $T<A_f$, когда возникающий под нагрузкой мартенсит не является термодинамически устойчивым. Обратимая деформация при $T<A_f$ связана с высоким уровнем накопленной упругой энергии ΔG_{el} , которая значительно превышает рассеянную энергию ΔG_{diss} , обратимое движение кристаллов мартенсита при разгрузке происходит за счет как химической части свободной энергии Гиббса ΔG_{ch} , так и ΔG_{el} . СЭ также обнаружена при $T>A_f$ в широком температурном интервале 50–100 К, величина механического гистерезиса равна $\Delta\sigma=150-300$ МПа, величина ε_{SE} изменяется от 3.5 до 5 %, максимальные значения ЭПФ варьируются от 4.5 до 6.5 %. В третьей группе ЭПФ и СЭ не обнаружены, что связано, во-первых, с потерей когерентного сопряжения решеток с высокотемпературной фазой и мартенситом и, во-вторых, с уменьшением ΔG_{el} и ростом ΔG_{diss} .

Впервые найдено, что старение под растягивающей нагрузкой 150 МПа кристаллов второго типа приводит к появлению двойного ЭПФ, величина которого ε_{TWSME} составляет до 3.5 %. Показано, что изменение температуры через интервал МП в свободном состоянии (циклировании) до 100 циклов не приводит к значительному уменьшению величины ε_{TWSME} , который остается равным 3-3.2 %.

При деформации сжатием [001]-кристаллов СЭ не наблюдается во всех типах превращений, что связано с большими значениями ΔG_{diss} . Предполагается, что при сжатии в отличие от растяжения при деформации происходит раздвойникование кристаллов мартенсита и в результате двойники при своем движении взаимодействуют с частицами γ' -фазы и происходит поворот плоскости габитуса относительно своего положения в мартенсите охлаждения. ЭПФ при сжатии [001]- кристаллов составляет от 2.5 до 3.5 %, что значительно меньше, чем при деформации растяжением при сохранении остальных параметров – размера частиц, температуры испытаний и нагрева – единичными.

Ориентационная зависимость напряжений начала МП под нагрузкой $\sigma_{0.1}^{\gamma-\alpha'}$ в интервале от 77 до 573 К, величины СЭ и ее температурного интервала, величины ЭПФ и ее зависимости от уровня приложенных напряжений от 5 до 550 МПа исследована при деформации растяжением кристаллов ориентированных вдоль $[\bar{1}23]$ - и [001]- направлений. Показано, что величина $\alpha = \sigma_{0.1}^{\gamma-\alpha'}/dT$ в $[\bar{1}23]$ кристаллах значительно выше, чем в [001], что связано согласно с соотношением (1), с меньшими значениями $\varepsilon_{SME}[\bar{1}23]<\varepsilon_{SME}[100]$. Механический гистерезис в $[\bar{1}23]$ кристаллах превышает $\Delta\sigma[001]$, а температурный интервал СЭ, напротив, в $[\bar{1}23]$ ориентации оказывается ниже. Это связано, во-первых, с ориентационной зависимостью напряжений в высокотемпературной фазе: $\sigma_{0.1}^{[123]}(M_d)<\sigma_{0.1}^{[001]}(M_d)$, а температура M_d в $[\bar{1}23]$ кристаллах меньше, чем в [001]. Во-вторых, высокие значения $\Delta\sigma$ в $[\bar{1}23]$ -кристаллах связаны с влиянием внешних напряжений на процессы раздвойникования, которые отсутствуют в [001]- кристаллах при деформации растяжением. Как отмечалось выше для [001] кристаллов при сжатии, в $[\bar{1}23]$ кристаллах при растяжении при раздвойниковании рост ΔG_{diss} связан с необходимостью взаимодействовать двойникам с частицами γ' -фазы и с отклонением плоскости габитуса от своего положения в термическом мартенсите, что приводит к образованию дислокаций при $\gamma-\alpha'$ МП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-49-04101).