

УДК 669.35.539.211

ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ Ni_3Ge С РАЗНЫМИ ОРИЕНТАЦИЯМИ ОСИ СЖАТИЯ¹

© 2020 г. Ю. В. Соловьева¹, С. В. Старенченко¹*, В. А. Старенченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

*E-mail: sve-starenchenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 27.07.2020 г.

Приведены результаты термоактивационного анализа пластической деформации монокристаллов интерметаллида Ni_3Ge . Определены значения эффективной энергии активации пластической деформации для разных температур испытания. Рассматривается влияние ориентации монокристалла на величину эффективной энергии активации. Исследования проведены для кристаллов деформированных вдоль оси [100] и $[\bar{2}34]$.

DOI: 10.31857/S0367676520110289

ВВЕДЕНИЕ

Пластическая деформация кристаллических тел является термически активируемым процессом, связанным с перестройкой атомной структуры кристалла под действием термических флуктуаций. Термоактивационный анализ пластического поведения материалов, в основе которого лежит рассмотрение движения дислокации под действием приложенных напряжений, широко используется для чистых металлов. Здесь учитывается то, что когерентные атомные флуктуации способствуют приложенному напряжению продвигать дислокацию через препятствия [1]. Основные методики получения термоактивационных характеристик хорошо известны и подробно описаны в [2]. Одним из экспериментальных методов измерения энергии активации является метод, в котором используются данные двух типов опытов: это опыты по вариации скорости деформации [3] и опыты по вариации температуры [4].

Стандартная формула для расчета энергии активации, применяемая в данном методе:

$$U = kT^2 \left(\frac{\Delta \ln \dot{\epsilon}}{\Delta \tau_1} \right)_T \left(\frac{\Delta \tau_2}{\Delta T} \right)_\epsilon, \quad (1)$$

где $\Delta \tau_1$ – скачок напряжений в результате изменения скорости деформации $\Delta \ln \dot{\epsilon}$ при неизменной температуре T , $\Delta \tau_2$ – скачок напряжений в ре-

зультате изменения температуры при неизменной скорости деформации $\dot{\epsilon}$.

К сплавам со сверхструктурой $L1_2$, известных аномальной температурной зависимостью механических свойств, приемы термоактивационного анализа, разработанные для чистых металлов, неприменимы в силу специфических особенностей, возникающих при испытании в условиях вариации температуры и скорости деформации. В этом случае температура оказывает двойное влияние на сопротивление движению дислокации. С одной стороны, когерентные атомные флуктуации способствуют приложенному напряжению продвигать дислокации через препятствия. С другой стороны, те же когерентные флуктуации способствуют самоблокировке сверхдислокаций. Возникает необходимость разделения механизмов, дающих аномальный и нормальный вклады в изменение различных характеристик пластической деформации. Как показано нами при анализе опытов по вариации скорости деформации и температуры в случае сплавов со сверхструктурой $L1_2$ такое разделение возможно [5–8].

Определение энергии активации механизмов, дающих нормальные вклады в изменение напряжений течения при вариации температуры и скорости деформации для интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$, затруднено. Связано это, прежде всего, с очень низкой скоростной чувствительностью предела текучести и напряжений течения в области температурной аномалии механических характеристик. Низкие значения скачка напря-

¹ Данная статья была представлена для опубликования в тематическом выпуске “Упорядочение в минералах и сплавах” (см. № 9 и № 11, том 84, 2020).

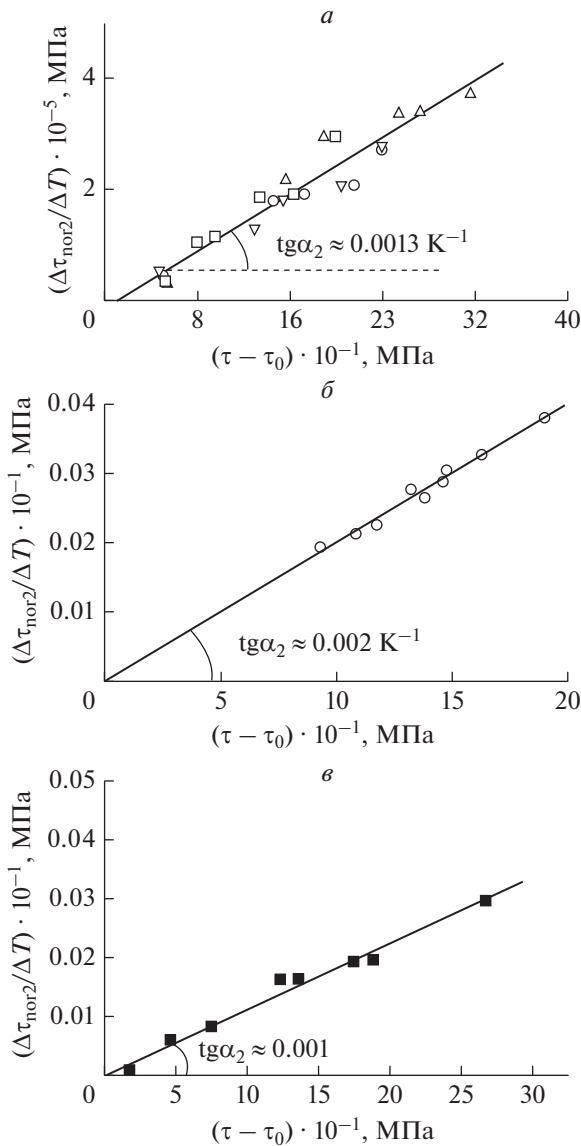


Рис. 1. Зависимость отношения величины нормальной составляющей скачка напряжений к величине изменения температуры $(\Delta\tau_{nor2}/\Delta T)$ от деформирующего напряжения в монокристаллах Ni_3Ge : (а) ориентация [001], вариация температуры от 293 до 773 К; (б) ориентация [001], вариация температуры от 673 до 773 К; (в) ориентация $[\bar{2}34]$, вариация температуры от 473 до 673 К.

жений при вариации скорости деформации (в некоторых случаях имеющие нулевые и отрицательные значения), измеряемые по стандартной методике, и аномальная температурная зависимость напряжений течения, приводят к невозможности определения энергии активации. Развиваемый в настоящей работе подход, в основе которого лежит идея необходимости разделения механизмов деформации на механизмы характерные для чистых металлов и механизмы специфические для

сплавов со сверхструктурой $L1_2$, позволяет применить методы стандартного термоактивационного анализа к сплавам с положительной температурной зависимостью механических характеристик. Согласно этому подходу, для того чтобы получить значение энергии активации механизмов, дающих нормальные вклады в изменение напряжений течения в сплавах со сверхструктурой $L1_2$, формулу (1) необходимо модифицировать:

$$U = kT^2 \left(\frac{\Delta \ln \dot{\epsilon}}{\Delta \tau_{nor1}} \right)_T \left(\frac{\Delta \tau_{nor2}}{\Delta T} \right)_\dot{\epsilon}, \quad (2)$$

где $\Delta\tau_{nor1}$ – доля нормальной составляющей скачка напряжений, полученной в результате вариации скорости деформации $\Delta \ln \dot{\epsilon}$ при неизменной температуре T , связанная с преодолением дислокационных стопоров $\Delta\tau_{nor1}$ [5, 6], $\Delta\tau_{nor2}$ – нормальная составляющая скачка напряжений в результате изменения температуры на ΔT при неизменной скорости деформации $\dot{\epsilon}$ [7, 8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплав состава 75 ат. % Ni и 25 ат. % Ge, выплавлен в печи сопротивления в вакууме из никеля марки Н–0 и Ge высокой чистоты (99.999). Из полученного сплава в атмосфере очищенного аргона по методу Чохральского выращен монокристаллический слиток, из которого вырезались электроискровым методом образцы для сжатия, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда, размером $3.0 \times 3.0 \times 6.0 \text{ мм}^3$. Деформацию осуществляли путем одноосного сжатия монокристаллов сплава Ni_3Ge с осью деформации, совпадающей с направлениями [001] и $[\bar{2}34]$.

ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ОРИЕНТАЦИИ [001]

Выбор направления оси сжатия обуславливает разные механизмы скольжения дислокаций. При ориентации монокристалла вдоль оси [001] сжатие активирует октаэдрическое скольжение дислокаций. Оценим величины энергии активации механизмов, дающих нормальные вклады в изменение напряжений течения, для данной ориентации при разных температурах.

Температура 293 К

Для вычисления энергии активации механизмов, дающих нормальный вклад в изменение сдвиговых напряжений при температуре 293 К, использованы данные по вариации температуры деформации от комнатной к повышенным температурам [5, 6]. Было выяснено, что отношение

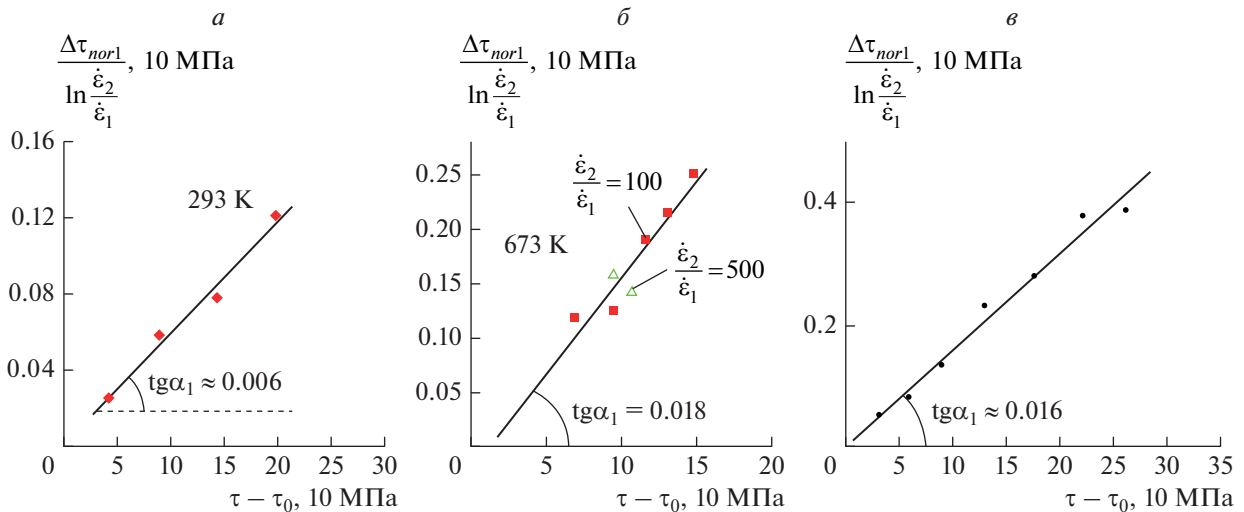


Рис. 2. Зависимость величины нормальной составляющей скачка напряжений от деформирующего напряжения в монокристаллах Ni₃Ge: (а) ориентация [001], вариация скорости деформации от $\dot{\epsilon}_1 = 5.5\% \text{ мин}^{-1}$ до $\dot{\epsilon}_2 = 0.4\% \text{ мин}^{-1}$, $T = 293 \text{ K}$; (б) ориентация [001], вариация скорости деформации в 100 и в 500 раз ($\dot{\epsilon}_2 = 0.4\% \text{ мин}^{-1}$), $T = 673 \text{ K}$; (в) ориентация $[\bar{2}34]$, вариация скорости деформации от $\dot{\epsilon}_1 = 5.5\% \text{ мин}^{-1}$ до $\dot{\epsilon}_2 = 0.4\% \text{ мин}^{-1}$, $T = 473 \text{ K}$.

нормальной составляющей скачка напряжений к изменению температуры ($\Delta\tau_{nor2}/\Delta T$) имеет одинаковые значения вне зависимости от величины скачка температуры ΔT и зависит только от напряжения. На графике, на рис. 1а видно, что экспериментальные значения $\Delta\tau_{nor2}/\Delta T$ связаны линейно с величиной деформирующего напряжения: $\Delta\tau_{nor2}/\Delta T = \text{tg}\alpha_2 (\tau - \tau_0)$. Данные, полученные в опытах по вариации скорости деформации на монокристаллах Ni₃Ge ориентации [001] при комнатной температуре [7, 8], также были использованы для вычисления энергии активации.

Величина $\Delta\tau_{nor1}/\ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$ зависит линейно от приложенного напряжения при комнатной температуре, как показано на рис. 2а:

$$\Delta\tau_{nor1}/\ln \dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1 = \text{tg}\alpha_1 (\tau - \tau_0).$$

Линейная зависимость величин $\Delta\tau_{nor1}/\ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$ и $\frac{\Delta\tau_{nor2}}{\Delta T}$ от деформирующего напряжения означает независимость энергии активации от величины приложенных напряжений, которая может быть вычислена графически:

$$U = kT^2 \frac{\text{tg}\alpha_2}{\text{tg}\alpha_1} = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 293^2 \cdot \frac{0.0013}{0.006} = (2.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{ат}} = (1.6 \pm 0.13) \text{ эВ/ат}.$$

Температура 673 К

Для определения энергии активации при температуре 673 К провели опыты по вариации температуры от 673 до 773 К. Была выделена нормальная составляющая скачка напряжений, соответствующая выбранной вариации. Полученная в результате зависимость $\Delta\tau_{nor2}/\Delta T$ от приложенного напряжения показана на рис. 1б. Дополнив полученные данные результатами опытов по вариации скорости деформации при температуре 673 К (рис. 2б), получили значение энергии активации:

$$U = kT^2 \frac{\text{tg}\alpha_2}{\text{tg}\alpha_1} = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 673^2 \cdot \frac{0.002}{0.018} = (6.9 \pm 0.8) \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{ат}} = 4.3 \pm 0.5 \text{ эВ/ат}.$$

ЭНЕРГИЯ АКТИВАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ОРИЕНТАЦИИ $[\bar{2}34]$

Для того чтобы получить значения энергии активации механизмов, дающих нормальные вклады в изменение напряжений течения в условиях кубического скольжения, использовали результаты опытов по вариации температуры деформации монокристаллов сплава Ni₃Ge ориентации $[\bar{2}34]$ [6]. Из полного скачка напряжений, полученного в результате вариации температуры [6], выделена нормальная составляющая скачка напряжений, ее зависимость от приложенного напряжения

приведена на рис. 1*в*. На рис. 2*в* приведены зависимости нормальной составляющей скачка напряжений при вариации скорости деформации для монокристаллов ориентации $[\bar{2}34]$ при температуре 473 К. Используя эти данные, получили значения энергии активации для кубического скольжения для температуры 473 К:

$$U = kT^2 \frac{\text{tg}\alpha_2}{\text{tg}\alpha_1} = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 473^2 \cdot \frac{0.001}{0.016} = (1.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{ат}} = 1.2 \pm 0.12 \text{ эВ.}$$

ВЫВОДЫ

На основании подхода, основанного на разделении нормального и аномального отклика на изменение скорости или температуры деформации, получены величины эффективной энергии активации механизмов, связанных с нормальными вкладами в изменение напряжений течения при октаэдрическом и кубическом скольжении. Для октаэдрического скольжения (ориентация монокристаллов [001]): $U = 1.6 \pm 0.13$ эВ, при $T = 293$ К и $U = 4.3 \pm 0.5$ эВ, при $T = 673$ К. Для кубическо-

го скольжения (ориентация монокристаллов $[\bar{2}34]$): $U = 1.2 \pm 0.12$ эВ, при $T = 473$ К.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2020-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kocks U.F., Argon A.S., Ashby M.F.* Thermodynamics and kinetics of slip. Oxford, New York: Pergamon Press, 1975. 291 p.
2. *Орлов Н.А.* Термически активированные процессы в кристаллах. М.: Мир, 1973. 212 с.
3. *Basinski Z.S.* // Phil. Mag. 1959. V. 4. P. 393.
4. *Kottrell A.N., Stokes R.J.* // Proc. Roy. Soc. A. 1955. V. 233. P. 17.
5. *Соловьева Ю.В., Старенченко С.В.* // Изв. вузов. Физ. 2014. Т. 57. № 2. С. 54.
6. *Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Соловьёв А.Н. и др.* // Изв. вузов. Физ. 2015. № 5. С. 58.
7. *Старенченко В.А., Соловьева Ю.В., Геттингер М.В., Ковалевская Т.А.* // ФММ. 2005. Т. 100. № 4. С. 78.
8. *Соловьева Ю.В., Геттингер М.В., Ковалевская Т.А., Старенченко В.А.* // Деф. разр. мат. 2005. № 2. С. 20.