

УДК 539.22.26+539.37

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОАКТИВАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА Ni_3Ge^*

Соловьева Ю.В., д.ф.-м.н., профессор

Старенченко С.В., д.ф.-м.н., профессор (sve-starenchenko@yandex.ru)

Соловьев А.Н., аспирант

Старенченко В.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой, декан ООФ

Томский государственный архитектурно-строительный университет

(634063, Россия, Томск, пл. Соляная, 2)

Аннотация. Представлены результаты изучения термоактивационных характеристик при ползучести сплава Ni_3Ge , обладающего структурой $L1_2$. Исследование проведено на монокристаллах, деформация в которых осуществляется вдоль осей $[001]$, $[\bar{1}39]$, $[\bar{1}22]$ и $[\bar{2}34]$. Измерены энергии активации ползучести для исследованных ориентаций. Определено, что скорость установившейся ползучести описывается известным законом $d\varepsilon/dt = K_2\sigma^n$. Получены величины показателя степени n , делаются выводы о возможных механизмах ползучести. Показано, что ползучесть образцов, ориентированных вдоль разных осей, определяется дислокационными процессами, которые различаются энергией активации.

Ключевые слова: ползучесть, интерметаллиды, энергия активации.

Ползучесть является наиболее распространенным видом деформации, которая проявляется при эксплуатации конструкционных материалов при различных температурах. В упорядоченных фазах со сверхструктурой $L1_2$ ползучесть сопровождается выраженным проявлением аномальной температурной зависимости механических свойств. Для этого класса материалов исследования ползучести проведены в недостаточной степени. Существующие работы, в основном, касаются сплава Ni_3Al [1, 2]. Недостаточное внимание уделено определению энергии активации этого процесса, выяснению механизмов ползучести.

К классу сплавов, демонстрирующих аномалию механических свойств, относится и интерметаллид Ni_3Ge , который является весьма перспективным для практического применения, поскольку он демонстрирует характеристики, превосходящие наблюдаемые в сплаве Ni_3Al . Однако свойства ползучести сплава Ni_3Ge мало исследованы. Лишь в работах [3–8] выполнены исследования кривых течения для разных температурно-силовых условий, выявлены их особенности на монокристаллах разной ориентации. В настоящей работе представлены результаты изучения термоактивационных характеристик при ползучести сплава Ni_3Ge , обладающего структурой $L1_2$.

Сплав состава 75 % Ni и 25 % Ge (ат.) выплавлен в печи сопротивления под вакуумом (0,10–0,25 Па) из никеля марки Н-0 и германия высокой чистоты (99,999 %). Монокристаллы выращивали в печи СКБ-8093 по методу Чохральского из полученного сплава в атмосфере очищенного аргона. Для дефор-

мации сжатием электроискровым методом из монокристаллического слитка вырезали образцы в форме параллелепипедов размером 3,0×3,0×6,0 мм. Образцы ориентировали таким образом, чтобы сжатие осуществлялось вдоль осей $[001]$, $[\bar{1}39]$, $[\bar{2}34]$, $[\bar{1}22]$. Ориентацию оси кристаллов определяли дифрактометрическим методом. Точность определения ориентации составляла $\pm 2^\circ$. После электроискровой резки поверхность образцов очищали химическим травлением, затем образцы гомогенизировали при температуре 953 °С в течение 48 ч с охлаждением печи до комнатной температуры.

При механических испытаниях по ползучести образец нагружали сжатием до заданной нагрузки. Автоматическим управлением электропривода (с помощью компьютера) поддерживали постоянную внешнюю нагрузку с точностью ± 3 Н. Высокотемпературные испытания проводили в вакууме (0,10–0,25 Па). Нагрев осуществляли в печи сопротивления, точность поддержания температуры ± 2 °С. Исследования проводили при температурах 773, 873 и 923 К.

Исследования проводили на монокристаллах, деформация в которых осуществляется вдоль осей $[001]$, $[\bar{1}39]$, $[\bar{1}22]$ и $[\bar{2}34]$. В настоящем исследовании на основании результатов работ [3–8] изучены скоростные характеристики ползучести, выполнен термоактивационный анализ; полученные характеристики позволяют делать выводы о механизмах ползучести.

В общем случае скорость стационарной ползучести описывается следующим соотношением:

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT}\right),$$

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-02-92605 КО_а.

где $\dot{\epsilon}$ – скорость ползучести; σ – напряжение; ΔH – энтальпия превращения; T – температура; A – константа.

Для определения энергии активации ползучести применяли уравнение

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln K_1 - \left(\frac{\Delta H}{RT} \right),$$

где K_1 – константа, зависящая от напряжения, при котором происходит ползучесть.

Полагается, что для любого значения напряжения выполняется линейная зависимость скорости ползучести $\dot{\epsilon}$ от обратной температуры $1/T$.

Значения скорости ползучести, полученные при различных напряжениях и температурах испытаний на разных образцах, были использованы для построения зависимости $\ln \dot{\epsilon} - 1/T$. Графики имеют линейную зависимость с отрицательным угловым коэффициентом, что свидетельствует о том, что в рассматриваемом температурном интервале скорость ползучести определяется одним и тем же механизмом деформации.

В настоящей работе определены энергии активации стационарной ползучести для образцов, деформируемых с разной ориентацией (табл. 1).

Результаты исследований сплава Ni_3Ge показали, что энергия активации ползучести проявляет ориента-

ционную зависимость. Следует отметить, что эта зависимость мало чувствительна к изменению кубического направления оси кристаллов от $[001]$ к $[\bar{1}39]$. Численные значения этой величины для рассматриваемых ориентаций совпадают в пределах погрешности и принимают величины, превышающие 300 кДж/моль. Однако заметное отклонение ориентации кристалла от кубического направления к октаэдрическому ($[\bar{1}22]$ и $[\bar{2}34]$) приводит к существенному понижению энергии активации (табл. 1); в этом случае энергия активации уменьшается в 20 – 50 раз. Необходимо отметить, что энергия активации ползучести для каждой ориентации не зависит от напряжения, при котором осуществляется течение, что свидетельствует о едином механизме ползучести при разных напряжениях.

Анализ скоростных зависимостей ползучести показывает, что скорости установившейся ползучести зависят от многих факторов (таких как ориентация, температура, напряжение). Повышение температуры и напряжения способствует возрастанию скорости. Переход от кубической ориентации к октаэдрической (то есть переход от октаэдрического скольжения к скольжению в плоскостях куба) приводит к значительному уменьшению скорости ползучести (табл. 2 – 4).

Из экспериментальных исследований чистых металлов установлено, что влияние напряжений на скорость

Таблица 1

Энергия активации ползучести для различных ориентаций монокристалла сплава Ni_3Ge

Ориентация	[100]		[$\bar{1}39$]		[$\bar{1}22$]		[$\bar{2}34$]
σ , МПа	370	1040	320	850	230	330	230
ΔH , кДж/моль	340 ± 35	330 ± 18	346 ± 40	382 ± 115	$7,66 \pm 1,6$	$5,33 \pm 3,5$	15,9

Таблица 2

Скорости установившейся ползучести при ориентации оси деформации монокристалла [001]

σ , МПа	Скорость установившейся ползучести, s^{-1} , при температуре, К			
	773	873	923	973
1040	$2 \cdot 10^{-9} \cdot (8,3)$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$ изменяется $7,7 \cdot 10^{-5}$
370		$1,4 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3

Скорости установившейся ползучести при ориентации оси деформации монокристалла [$\bar{1}39$]

σ , МПа	Скорость установившейся ползучести, s^{-1} , при температуре, К			
	873	923	973	1023
850	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$ (0,1 ч) изменяется	$1,2 \cdot 10^{-4}$ (0,1 ч) изменяется	–
320	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	–	$5,6 \cdot 10^{-5}$

Скорости установившейся ползучести при ориентации оси деформации монокристаллов $[\bar{1}22]$ и $[\bar{2}34]$

σ , МПа	Скорость установившейся ползучести, c^{-1} , при температуре, К				
	873	923	973	773К	973
	$[\bar{1}22]$			$[\bar{2}34]$	
330	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$2,23 \cdot 10^{-7}$	$2,04 \cdot 10^{-7}$	–	–
230	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$2,70 \cdot 10^{-8}$	$2,90 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$

ползучести можно описать зависимостью $d\varepsilon/dt = K_2 \sigma^n$, где K_2 – константа материала, зависящая от температуры и энергетических характеристик. По величине показателя степени n можно сделать выводы о возможных механизмах ползучести при разных ориентациях и условиях.

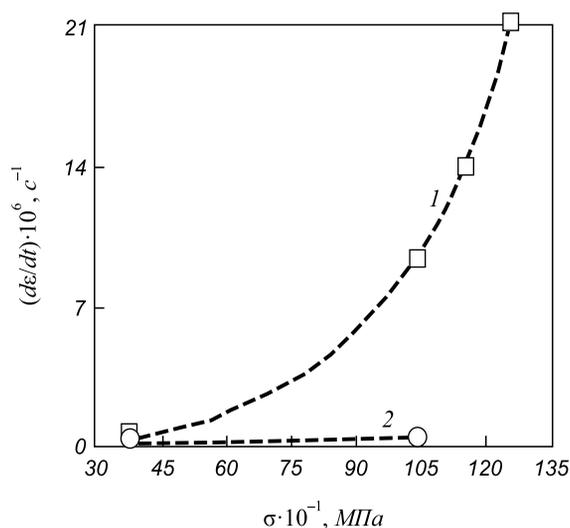


Рис. 1. Зависимость скорости ползучести монокристалла, ориентированного вдоль оси $[001]$, от напряжения при температурах испытания 923 К (\square) и 873 К (\circ)

На рис. 1 показана зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения для кристаллов, ориентированных вдоль оси $[001]$, при разных температурах ползучести. Математическая обработка полученных кривых демонстрирует степенную зависимость скорости ползучести (рис. 2, а). Показатель степени n для всех температур исследования выше $0,54 T_{пл}$ в пределах точности измерения одинаков и принимает значение примерно 3,4.

Подобный характер изменения скорости ползучести в зависимости от напряжения (рис. 2, б) проявляется при анализе экспериментальных зависимостей, полученных для монокристалла Ni_3Ge , ориентированного вдоль оси $[\bar{1}22]$. Однако показатель степени n для всех температур в данном случае имеет значение примерно 5,6.

Исследования скоростей стационарной ползучести [9] показывают, что разные механизмы обеспечивают соответствующий показатель степени n . Так, $n = 1$ характеризует диффузионную ползучесть; величины n , превышающие 3, указывают на механизмы, связанные с дислокационным движением. Показатель $n = 3$ обусловлен скольжением дислокаций, а $n = 5$, например, в чистых металлах, связан с переползанием дислокаций.

Значения показателя степени n в соотношении $d\varepsilon/dt = K_2 \sigma^n$ для монокристаллов сплава Ni_3Ge разных ориентаций приведены ниже:

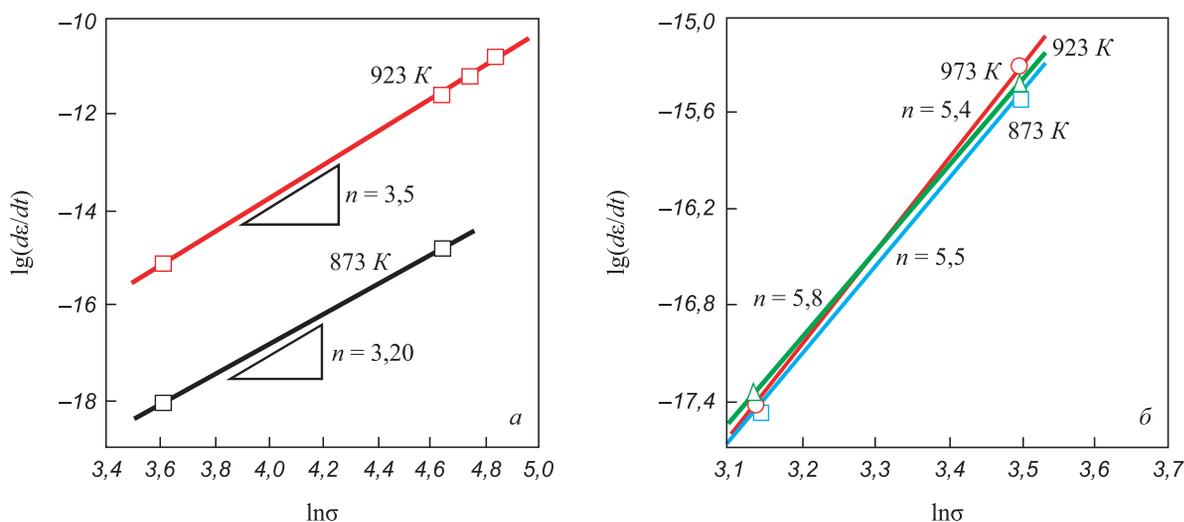


Рис. 2. Зависимость скорости ползучести монокристалла, ориентированного вдоль оси $[001]$ (а) и оси $[\bar{1}22]$ (б), от приложенного напряжения при разных температурах испытания

Ориентация	Значения n при температуре, К			$\sigma_2 - \sigma_1$, МПа
	873	923	973	
[001]	3,2	3,5		1040 – 370
$[\bar{1}22]$	5,5	5,8	5,4	330 – 230

Примечание: $\sigma_2 - \sigma_1$ – область напряжений исследования.

Выводы. Полученные результаты измерения показателя степени в законе ползучести монокристаллов, деформируемых вдоль разных осей, показывают, что в обоих исследованных случаях как при ориентации [001], так и при ориентации $[\bar{1}22]$ процессы ползучести обусловлены дислокационными процессами, различающимися энергией активации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Hemker K.J. A Study of the High-Temperature Deformation of the Intermetallic Alloy Ni₃Al. Ph. D. Thesis, Stanford University, Stanford, 1990.
- Hemker K.J., Nix W.D., Mills M.J. An investigation of the creep of Ni₃Al // Acta Metall. Mater. 1991. Vol. 39. №. 8. P. 1901 – 1913.
- Соловьева Ю.В., Геттингер М.В., Старенченко С.В., Старенченко В.А. Исследование ползучести монокристаллов сплава Ni₃Ge // Изв. вузов. Физика. 2009. № 4. С. 53 – 59.
- Соловьева Ю.В., Старенченко В.А., Старенченко С.В., Геттингер М.В., Шалыгина Т.А. Изучение процессов деформации монокристаллов сплава Ni₃Ge, ориентированных вдоль направления $[\bar{1}39]$ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 12. С. 28 – 32.
- Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Геттингер М.В., Старенченко В.А. Изучение кривых ползучести монокристаллов сплава Ni₃Ge разной ориентации // Изв. вуз. Физика. 2009. № 9/2. С. 98 – 107.
- Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Пантюхова О.Д., Старенченко В.А. Изучение ползучести в монокристаллах Ni₃Ge, ориентированных вдоль осей $[\bar{2}34]$ и $[\bar{1}22]$ // Изв. РАН. Серия физическая. 2012. Vol. 76. № 7. С. 868 – 871.
- Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Старенченко В.А. Ползучесть интерметаллидов со сверхструктурой L1₂ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Vol. 6. № 3. с. 41 – 54.
- Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Старенченко В.А. Влияние оси деформации на ползучесть монокристаллов сплава Ni₃Ge // Изв. РАН. Серия физическая. 2011. Vol. 75. № 2. С. 222 – 226.
- Kassner M.E., Pe´rez-Prado M.-T. Fundamentals of Creep in Metals and Alloys. – Elsevier Ltd., 2004. 267 p.

© 2014 г. Соловьева Ю.В., Старенченко С.В.,
Соловьев А.Н., Старенченко В.А.
Поступила 23 декабря 2013 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 10. Vol. 57, pp. 58–61.

ORIENTATION DEPENDENCE OF CREEP THERMOACTIVATION PARAMETERS IN Ni₃Ge SINGLE CRYSTALS

Solov'eva Yu.V., Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor
Starenchenko S.V., Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor
(sve-starenchenko@yandex.ru)

Solov'ev A.N., Postgraduate
Starenchenko V.A., Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor

Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia)

Abstract. The paper presents the research results of different characteristics of the Ni₃Ge alloy possessing L1₂ structure. The research of single crystals is carried out. Their deformation is oriented along axes [001], $[\bar{1}39]$, $[\bar{1}22]$ and $[\bar{2}34]$. The activation energies of creep for the investigated orientations are measured. The steady-state creep rate is described by the well-known law $de/dt = K_2\sigma^n$. Values of the steady-state stress exponent, n , are received. Conclusions about possible mechanisms of creep are done. It is shown, that creep of the samples oriented along different axes is carried out by the dislocation processes with different activation energies.

Keywords: creep, intermetallic compounds, activation energy.

REFERENCES

- Hemker K.J. A Study of the High-Temperature Deformation of the Intermetallic Alloy Ni₃Al. Ph. D. Thesis, Stanford University, Stanford, 1990.
- Hemker K.J., Nix W.D., Mills M.J. An investigation of the creep of Ni₃Al. Acta Metall. Mater. 1991, Vol. 39, no. 8, pp. 1901–1913.
- Solov'eva Yu.V., Gettinger M.V., Starenchenko S.V., Starenchenko V.A. The creep behavior of single-crystalline Ni₃Ge alloys. Russian Physics Journal. 2009, Vol. 52, no. 4, pp. 390–397. (In Russ.).
- Solov'eva Yu.V., Starenchenko V.A., Starenchenko S.V., Gettinger M.V., Shalygina T.A. Deformation of single-crystalline Ni₃Ge alloy oriented towards direction $[\bar{1}39]$. Steel in translation. 2009, no. 12, pp. 1043–1047. (In Russ.).
- Solov'eva Yu.V., Starenchenko S.V., Gettinger M.V., Starenchenko V.A. Creep curve study of single-crystalline Ni₃Ge alloys of different orientation. Izv. vuz. Fizika. 2009, no. 9/2, pp. 98–107. (In Russ.).
- Solov'eva Yu.V., Starenchenko S.V., Pantyukhova O.D., Starenchenko V.A. Creep investigation of Ni₃Ge alloy single crystals oriented along axes $[\bar{2}34]$ and $[\bar{1}22]$. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2012, Vol. 76, no. 7, pp. 778–781. (In Russ.).
- Solov'eva Yu.V., Starenchenko S.V., Starenchenko V.A. Intermetal creep with L1₂ superstructure. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. 2009, Vol. 6, no. 3, pp. 41–54. (In Russ.).
- Solov'eva Yu.V., Starenchenko S.V., Starenchenko V.A. Effect of the orientation of strain axes on the creep in Ni₃Ge alloy single crystals. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011, Vol. 75, no. 2, pp. 202–206. (In Russ.).
- Kassner M.E., Pe´rez-Prado M.-T. Fundamentals of Creep in Metals and Alloys. Elsevier Ltd., 2004. 267 p.

Acknowledgements. The reported study was partially supported by RFBR, research project no. 14-02-92605.

Received December 23, 2013