

Механические свойства высокоэнтропийного сплава $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$ в интервале температур 4,2–300 К

М.А. Лактионова, Е.Д. Табачникова

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: laktionova.marina@gmail.com*

З. Танг, П.К. Лиану

Университет Теннесси, Кноксвилл, 37996, США

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2012 г., после переработки 12 февраля 2013 г.

Впервые в области низких температур (вплоть до 4,2 К) изучены закономерности пластической деформации при одноосном сжатии высокоэнтропийного сплава $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$, полученного методом аргоно-дуговой плавки. Установлено, что понижение температуры от 300 до 4,2 К приводит к росту величины условного предела текучести от 450 до 750 МПа при сохранении во всем указанном интервале температур величины пластичности сплава порядка 30%. При деформациях $\epsilon \sim 2\%$ методом циклирования скорости измерена скоростная чувствительность деформирующего напряжения. В предположении термоактивированного характера пластической деформации для $\epsilon \sim 2\%$ вычислены величины активационного объема для движения дислокаций, значения которого изменялись от $122b^3$ при 300 К до $35b^3$ при 30 К (b — вектор Бюргерса).

Вперше в області низьких температур (до 4,2 К) вивчено закономірності пластичної деформації при одноосному стисненні високоентропійного сплаву $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$, який отримано методом аргоно-дугової плавки. Встановлено, що зниження температури від 300 до 4,2 К призводить до зросту величини умовної межі текучості від 450 до 750 МПа при збереженні у всьому вказаному інтервалі температур величини пластичності сплаву на рівні 30%. При деформації $\epsilon \sim 2\%$ методом циклювання швидкості виміряно швидкісну чутливість деформаційної напруги. В припущенні термоактивованого характеру пластичної деформації для $\epsilon \sim 2\%$ обчислено величини активційного об'єму для руху дислокацій, значення якого змінювались від $122b^3$ при 300 К до $35b^3$ при 30 К (b — вектор Бюргерса).

PACS: 62.20.F– Деформация и пластичность;
62.20.–x Механические свойства твердых тел.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, пластическая деформация, низкие температуры.

1. Введение

Механические свойства нового класса материалов — литых многокомпонентных сплавов — в последнее время активно исследуются [1–3], особенно в области комнатной и повышенных температур. Эти сплавы, получившие название высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), состоят как минимум из пяти металлических элементов, концентрация каждого из которых составляет от 5 до 35 ат.% [4,5]. Предполагается, что устойчивость такой структуры достигается вследствие высокого значения энтропии смешения. Снижение свободной энергии за счет высокой энтропии смешения дает возможность получить простые структуры в многокомпонентных

сплавах [5–7]. В результате этого ВЭС более термически стабильны и обладают большей прочностью по сравнению с традиционными сплавами [8,9]. Установлено [1], что высокотемпературные прочностные характеристики ВЭС определяются подбором элементов сплава, отличающихся атомными радиусами, температурой плавления, коэффициентами диффузии и их концентрацией. В литературе для интервала температур от комнатной до 1200 °С активно обсуждаются [1,6,10,11] особенности механических свойств ВЭС и их связь с микроструктурой. Особенно подробно изучен сплав $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$ (концентрации элементов заданы в молярном отношении). Установлено [6], что структура данного сплава представляет собой твердый раствор с

ГЦК решеткой, состоящий из двух фаз, отличающихся химическим составом. В матричной фазе наблюдаются области, обогащенные медью, которые имеют форму дендритов размером 1–10 мкм и содержат нанокристаллические включения размерами 5–10 нм. Найдено [10], что при температурах выше комнатной в сплаве хорошо сочетаются высокая прочность и пластичность. Такой сплав является перспективным конструкционным материалом. Однако экспериментальные данные о пластических свойствах ВЭС при температурах ниже комнатной отсутствуют. В связи с этим представляет интерес экспериментальное исследование механических свойств (прочности и пластичности) данных сплавов при криогенных температурах.

Цель данной работы — изучение механических свойств ВЭС $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$ при понижении температуры от 300 до 4,2 К. Изучение низкотемпературных механических свойств сплава $Al_{0,5}CoCrCuFeNi$ важно не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения.

2. Методика исследования

Исходные заготовки получали плавкой компонентов (чистотой не ниже 99 ат.%) в дуговой печи в атмосфере очищенного аргона. Плавку и затвердевание повторяли несколько раз для обеспечения гомогенности образцов. Полученный стержень диаметром 2 мм разрезали на цилиндрические образцы длиной 4 мм. Для того чтобы нагружаемые торцы были взаимнопараллельны, их предварительно отшлифовывали. Деформацию производили на жесткой деформационной машине (жесткость машины $\sim 7 \cdot 10^6$ Н/м) одноосным сжатием со скоростью $4 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ в интервале температур 4,2–300 К. Промежуточные температуры в интервале 77–300 К были получены продуванием паров азота через охватывающий образец душ, а температуры в интервале 4,2–77 К — охлаждением образца парамагнетиком. Полученные диаграммы «нагрузка–время» перестраивали в деформационные кривые «напряжение–пластическая деформация» $\sigma(\epsilon)$. Величину σ определяли как отношение нагрузки к начальной площади поперечного сечения образца. Величину ϵ вычисляли как отношение изменения длины образца, обусловленного пластической деформацией, к его начальной длине. Нагружение образцов во всем температурном интервале прекращалось при деформациях ~ 20 –30%. При деформациях $\sim 2\%$ измеряли скоростную чувствительность деформирующего напряжения $\Delta\sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$, для чего скорость деформации $\dot{\epsilon}$ увеличивали в 4,4 раза.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены типичные деформационные кривые в координатах $\sigma(\epsilon)$ для различных температур от 300 до 4,2 К.

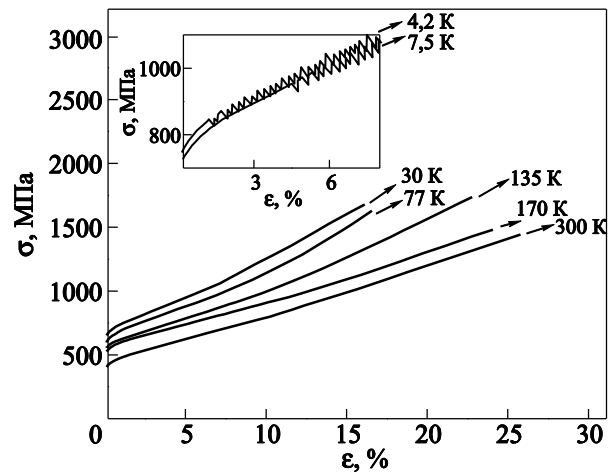


Рис. 1. Типичный вид деформационных кривых $\sigma(\epsilon)$ для различных температур при деформировании сжатием. На вставке — скачкообразные деформационные кривые для 7,5 и 4,2 К.

Видно, что в этом температурном интервале кривые $\sigma(\epsilon)$ имеют стадийный характер, типичный для крупнозернистых поликристаллических ГЦК металлов [12]. После параболической начальной стадии при $\epsilon \sim 1\%$ на кривых $\sigma(\epsilon)$ наблюдается переход к стадии линейного упрочнения. Во всем интервале температур в образцах наблюдали высокую пластичность. Разрушение образцов не наблюдалось вплоть до деформаций $\sim 30\%$, когда нагружение прекращалось.

Переход от параболической начальной стадии к стадии линейного упрочнения для разных температур наглядно виден на рис. 2, где показана зависимость скорости деформационного упрочнения $d\sigma/d\epsilon$ от пластической деформации ϵ .

При температурах ниже 15 К на деформационных кривых наблюдается переход пластического течения от плавного к скачкообразному. На вставке к рис. 1 показан типичный вид скачкообразной деформационной

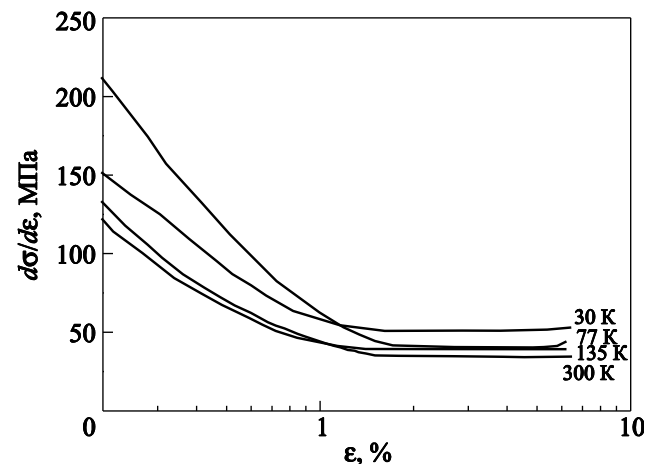


Рис. 2. Зависимости коэффициента упрочнения $d\sigma/d\epsilon$ от пластической деформации ϵ при различных температурах.

кривой в координатах $\sigma(\epsilon)$, измеренной при 4,2 и 7,5 К. Видно, что при температуре 4,2 К скачки напряжения начинаются при деформации $\epsilon = 1,2\%$, а при 7,5 К — 4,5%. Величина скачков напряжения $\Delta\sigma$ увеличивается с ростом деформации, так при 4,2 К она возрастает от 20 МПа при $\epsilon \sim 2\%$ до 67 МПа при $\epsilon \sim 23\%$. Отметим, что в области криогенных температур изменение вида пластического течения от плавного к скачкообразному характерно для многих поликристаллических ГЦК сплавов [13,14].

На рис. 3 представлена температурная зависимость условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ в интервале температур 4,2–300 К. Так, при 300 К величина условного предела текучести составляет 450 МПа, что значительно превышает аналогичные значения для крупнозернистых поликристаллических ГЦК сплавов, таких как Cu–11,8 ат.% Al (~70 МПа), Cu–20 ат.% Ni (~50 МПа) [9] и Al–3,8 ат.% Li (~150 МПа) [15]. Из сравнения результатов, приведенных на рис. 3, и данных о температурной зависимости модуля упругости E для сплава аналогичного состава [16], следует, что предел текучести сплава Al_{0,5}CoCrCuFeNi возрастает при понижении температуры сильнее модуля упругости.

На рис. 4 представлена температурная зависимость скоростной чувствительности деформирующего напряжения $\Delta\sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$, полученная для $\epsilon \sim 2\%$. Величина $\Delta\sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$ монотонно уменьшается при понижении температуры от 300 до 30 К.

Наблюдаемые температурные зависимости величин $\sigma_{0,2}$ и $\Delta\sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$ присущи термоактивированному характеру пластической деформации.

Исходя из этого предположения, для разных температур были вычислены значения активационного объема V движения дислокаций (при $\epsilon \sim 2\%$), согласно соотношению [8]:

$$V(T) = kT \frac{\Delta \ln \dot{\epsilon}}{\Delta \tau(T)}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, $\Delta \tau(T) = \Delta\sigma/m$ — изменение сдвигового на-

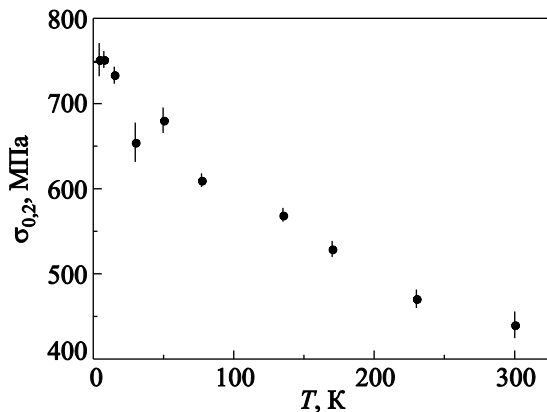


Рис. 3. Температурная зависимость условного предела текучести $\sigma_{0,2}$.

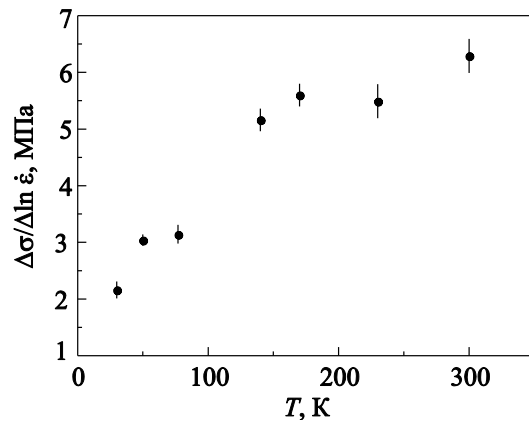


Рис. 4. Температурная зависимость скоростной чувствительности нормального деформирующего напряжения $\Delta\sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}$ для $\epsilon \sim 2\%$.

пряжения ($m = 3$ — фактор Тейлора для ГЦК решетки). Оказалось, что величина V уменьшается при понижении температуры от $122b^3$ при 300 К до $35b^3$ при 30 К (вектор Бюргерса $b = 2,54 \cdot 10^{-10}$ м для полных дислокаций систем скольжения $\{111\} \langle 110 \rangle$ [6]).

Зная температурную зависимость V (для $\epsilon \sim 2\%$), можно в первом приближении оценить длину дислокационного сегмента L , участвующего в термоактивационном движении:

$$L = \frac{V}{bd}, \quad (2)$$

где d — ширина термопреодолимого барьера. Приняв $d \approx b$, получаем $L \sim 31 \cdot 10^{-9}$ м (для 300 К) и $L \sim 8,9 \cdot 10^{-9}$ м (для 30 К). Оценив плотность точек закрепления дислокаций как $\rho = 1/L^2$, получаем значение ρ , равное $1,04 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ (для 300 К) и $1,26 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ (для 30 К). Приведенные данные на порядок больше аналогичных значений, полученных для ряда крупнозернистых ГЦК сплавов [15].

Однако идентификация микромеханизмов, определяющих пластическую деформацию в области низких температур, требует дополнительных экспериментальных исследований: влияния пластической деформации на микроструктуру сплава, получение подробных деформационных и температурных зависимостей его термоактивационных параметров и т.д.

4. Выводы и заключение

Впервые в интервале температур 4,2–300 К при деформации сжатием изучены закономерности пластической деформации высокоэнтропийного сплава Al_{0,5}CoCrCuFeNi.

В этом температурном интервале образцы обладают высокой пластичностью. Разрушение образцов не наблюдается при пластической деформации более 30%.

Установлено, что исследуемый сплав имеет высокую прочность. В интервале температур 300–4,2 К ус-

ловный предел текучести увеличивается от 450 до 750 МПа.

При температурах ниже 15 К характер деформационных кривых $\sigma(\epsilon)$ изменяется от плавного к скачкообразному.

В предположении термоактивированного характера пластической деформации для $\epsilon \sim 2\%$ вычислены величины активационного объема для термоактивированного движения дислокаций, значения которых уменьшаются при понижении температуры от $122b^3$ при 300 К до $35b^3$ при 30 К.

Проведенное исследование показало, что высокоэнтропийный сплав $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ может быть использован в широком интервале температур: от высоких (800 °С [10]) до 4,2 К, как материал, обладающий уникальным сочетанием высокой прочности и пластичности.

1. Chung-Jin Tong, Min-Rui Chen, Swe-Kai Chen, Jien-Wei Yen, Tao-Tsung Shun, Su-Jien Lin, and Shou-Yi Chang, *Metallurg. Mater. Transact. A* **36**, 1263 (2005).
2. K.B. Zhang, Z.Y. Fu, J.Y. Zhang, W.M. Wang, H. Wang, Y.C. Wang, Q.J. Zhang, and J. Shi, *Mater. Sci. Eng. A* **508**, 214 (2009).
3. Rui Li, Jiacheng Gao, and Ke Fan, *Mater. Sci. Forum* **650**, 265 (2010).
4. О.В. Соболев, А.А. Андреев, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, В.А. Столбовой, И.В. Сердюк, В.Е. Фильчиков, *Письма в ЖТФ* **38**, 40 (2012).
5. Jien-Wei Yeh, Swe-Kai Chen, Su-Jien Lin, Jon-Yien Gan, Tsung-Shune Chin, Tao-Tsung Shun, Chun-Huei Tsau, and Shou-Yi Chang, *Adv. Eng. Mater.* **6**, 299 (2004).
6. Chung-Jin Tong, Yu-Liang Chen, Swe-Kai Chen, Jien-Wei Yen, Tao-Tsung Shun, Chun-Huei Tsau, Su-Jien Lin, and Shou-Yi Chang, *Metallurg. Mater. Transact. A* **36**, 881 (2005).
7. С.А. Фирстов, В.Ф. Горбань, Н.А. Крапивка, Э.П. Печковский, Н.И. Даниленко, М.В. Карпец, *Современные проблемы физического материаловедения: Сб. научн. тр.*, ИПМ НАН Украины, Киев (2009).
8. H. Conrad, *High-Strength Materials*, V.F. Zackay (ed.), Wiley&Sons, New York (1964).
9. Е.Ф. Дударев, *Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов*, ТГУ, Томск (1988).
10. Che-Wei Tsai, Ming-Hung Tsai, Jien-Wei Yeh, and Chih-Chao Yang, *J. Alloys. Comp.* **490**, 160 (2010).
11. Chun Ng, Sheng Guo, Junhua Luan, Sanqiang Shi, and C.T. Liu, *Intermetallics* **31**, 165 (2012).
12. П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов, *Физические основы пластической деформации*, Металлургия, Москва (1982).
13. В.В. Пустовалов, *ФНТ* **26**, 515 (2000) [*Low Temp. Phys.* **26**, 375 (2000)].
14. Е.Д. Табачникова, А.В. Подольский, В.З. Бенгус, С.Н. Смирнов, В.Д. Нацик, В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Н. Великодний, Н.Ф. Андриевская, Г.Е. Сторожилов, Т.М. Тихоновская, *ФНТ* **34**, 1225 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 969 (2008)].
15. Н.В. Исаев, П.А. Забродин, В.З. Спусканюк, А.А. Давиденко, В.В. Пустовалов, В.С. Фоменко, И.С. Брауде, *ФНТ* **38**, 102 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 80 (2012)].
16. Ю.А. Семеренко, Е.Д. Табачникова, М.А. Лактионова, М.А. Тихоновский, А.С. Тортика, *Материалы IV Международной научно-практической конференции «Структурная релаксация в твердых телах»*, Винница, Украина (2012).

Mechanical properties of high-entropy alloy $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ in temperature region 4.2–300 K

M.A. Laktionova, E.D. Tabachnikova,
Z. Tang, and P.K. Liaw

It was for the first time that the peculiarities of plastic deformation of the high-entropy alloy $Al_{0.5}CoCrCuFeNi$ prepared by the arc-melting of its components in the purified argon atmosphere were studied under the uniaxial compression at low temperatures (down to 4.2 K). As the temperature decreases from 300 to 4.2 K, the value of yield stress is found increase from 450 to 750 MPa, respectively, the plasticity degree of 30% remaining unchanged in this temperature range. At the onset of deformation curves ($\epsilon \sim 2\%$) the strain rate sensitivity was determined by means of the method of strain rate cycling. Under the assumption that the plastic deformation is of thermally activated behavior, the values activation volume were calculated for the thermally activated dislocations movement. The values were found to vary from $122b^3$ at 300 K to $35b^3$ at 30 K.

PACS: 62.20.F– Deformation and plasticity;
62.20.–x Mechanical properties of solids.

Keywords: high-entropy alloy, plastic deformation, low temperatures.