

Особенности влияния микроструктуры на прочность композиционных материалов при статическом и циклическом нагружениях

С. А. Фирстов, Ю. Ф. Луговской

Установлено, что для исследованных поликристаллических материалов на основе меди зависимости предела текучести и ограниченного предела выносливости от размера зерна D в диапазоне размеров зерен 4—0,3 мкм пропорциональны параметру структуры D^{-l} . Показано, что уравнение Холла—Петча может быть применено в указанном диапазоне размеров зерен при условии, что коэффициент уравнения Холла—Петча подчиняется уравнению $K_y = K_B \cdot D^{-0,5}$.

В физике прочности известны многочисленные экспериментальные и теоретические результаты, которые показывают, что уменьшение размера зерна поликристаллических материалов обычно вызывает существенное повышение предела текучести $\sigma_{0,2}$ и разрушающего напряжения σ_p , описываемое уравнениями Холла—Петча и Мотта—Стро

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + K_y D^{-1/2}; \quad (1)$$

$$\sigma_p = K_p D^{-1/2} \quad \text{или} \quad \sigma_p = \sigma_0' + K_p' D^{-1/2}, \quad (2)$$

где D — средний размер зерна поликристаллического материала; постоянные σ_0, σ_0' — параметры, а K_y, K_p, K_p' — коэффициенты.

Вместе с тем при переходе к микро- и нанокристаллическим структурам могут наблюдаться отклонения от зависимости Холла—Петча. Так, в работах [1—5] отмечается переход от зависимости (1) к экспериментальной зависимости

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + K_b D^1 \quad (3)$$

при достижении некоторого критического размера структурного элемента в интервале $D = 20—0,2$ мкм. Размерность коэффициента K_b (МПа·м), естественно, отличается от размерности коэффициента K_y . Отметим, что, если в работах [1—3] такой переход наблюдался для железа и его сплавов, а также для алюминия и титана при образовании мелкозернистых структур деформационного происхождения, в работах [4, 5] указанный переход наблюдался и для хрома, полученного магнетронным распылением. При дальнейшем уменьшении размеров зерен при переходе в область наноразмеров, напротив, предсказывается и иногда отмечается снижение прочностных характеристик [6].

В данной работе предпринята попытка установить влияние размера зерна на пределы текучести и выносливости группы конденсированных материалов на основе меди, в которых размер зерна варьировали в диапазоне 4—0,3 мкм.

Материалы и методы исследования

В работе исследовали поликристаллические материалы на основе меди Cu—NbC, Cu—Mo и CuAl—Mo, полученные методом конденсации в вакууме компонентов на горячую подложку [7]. При этом исследовали

Cu—Mo в исходном состоянии, то есть после конденсации при температуре 720 °C, а также после отжига при температуре 950 °C. Объемная доля V_p частиц вторых фаз (NbC, Mo) в большинстве исследованных материалов не превышала 5%. Расчет увеличения пределов текучести Cu—NbC и Cu—Mo по формуле Орована показал, что упрочнение составляет соответственно 3 и 4%. Следовательно, основной эффект упрочнения достигался за счет измельчения размера зерна при введении дисперсных частиц. В то же время, по данным работы [8], в монокристаллах меди дисперсные частицы обеспечивают существенно более высокое упрочнение.

Испытания при статическом нагружении проводили стандартными методами. Сопротивление усталости материалов определяли при изгибе по методике нагружения образцов в резонансном режиме колебаний на частоте 1,5 кГц [9, 10]. Дислокационную структуру материалов после усталостных испытаний изучали на растровом электронном микроскопе JSM-200.

Результаты испытаний и их обсуждение

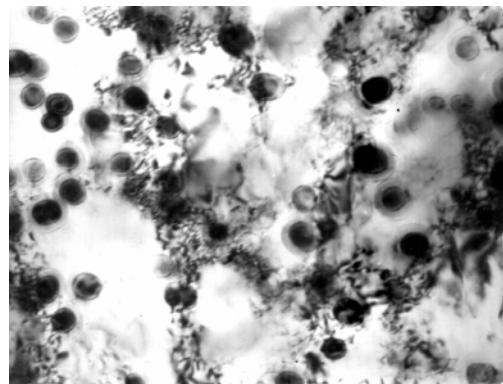
Результаты определения пределов текучести и выносливости σ_{-1} материалов при изгибе на базе $2 \cdot 10^6$ циклов, а также данные о структуре исследованных материалов представлены в таблице и на рис. 1. Данные механических испытаний для всех представленных в таблице материалов были проанализированы в координатах уравнений (1) и (3).

На рис. 2 в качестве примера приведены типичные зависимости пределов текучести и выносливости от размера зерна для Cu—NbC. Как видно из рис. 2, *a*, *в*, уравнение (1) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные для пределов текучести и выносливости соответственно. В то же время в координатах уравнения Холла—Петча наблюдается существенное отклонение от прямолинейной зависимости. Это отклонение может быть обусловлено тем обстоятельством, что в данном диапазоне размеров зерен коэффициент уравнения Холла—Петча K_y

Структура и механические свойства исследованных материалов

| Материал | V_p , % | D , мкм | D^{-1} , | $D^{-1/2}$, | σ_b | $\sigma_{0,2}$ | σ_{-1} |
|------------------------|-----------|-----------|-------------------|---------------------|------------|----------------|---------------|
| | | | мкм ⁻¹ | мкм ^{-1/2} | | | |
| Cu—NbC | 0,7 | 4,0 | 0,250 | 0,50 | 330 | 240 | 210 |
| | 0,75 | 3,9 | 0,256 | 0,51 | 350 | 230 | 218 |
| | 2,2 | 1,8 | 0,555 | 0,74 | 550 | 380 | 307 |
| | 3,7 | 1,2 | 0,833 | 0,91 | 730 | 620 | 338 |
| Cu—Mo, 720 °C | 2,4 | 1,5 | 0,666 | 0,82 | 470 | 310 | 215 |
| | 5,6 | 0,9 | 1,111 | 1,05 | 640 | 470 | 290 |
| Cu—Mo, 720 + 950 °C | 1,0 | 2,2 | 0,454 | 0,67 | 335 | 210 | 172 |
| | 2,4 | 1,6 | 0,625 | 0,79 | — | — | 215 |
| | 5,6 | 1,0 | 1,000 | 1,00 | — | — | 318 |
| Cu | 0 | 22 | — | — | 210 | 80 | 150 |
| CuAl—Mo | 2,0 | 1,1 | 0,909 | 0,94 | 600 | 450 | 222 |
| | 4,0 | 0,5 | 2,000 | 1,41 | 750 | 670 | 258 |
| | 6,0 | 0,4 | 2,500 | 1,58 | 820 | 740 | 245 |
| | 8,0 | 0,35 | 2,857 | 1,69 | 875 | 830 | 280 |
| | 10,0 | 0,30 | 3,333 | 1,83 | 900 | 880 | 292 |
| Cu—5% Al | — | 20,0 | — | 0,22 | 340 | 180 | 208 |

Рис. 1. Характерная ячеистая дислокационная структура Cu—2,4% Mo ($T_{\text{п}} = 720^{\circ}\text{C}$) (x56 000).



не является константой, а также зависит от размера зерна. Соответствующие зависимости $K_y(D)$ для всех изученных материалов приведены на рис. 3, *a*. Данные были получены из зависимостей, приведенных на рис. 2, *б*, *г*. Как следует из представленных данных, хорошо выполняется линейная зависимость $K_y(D^{-0.5})$.

Такую эмпирическую зависимость, по нашему мнению, можно обосновать, сравнив уравнения (1) и (3). В обоих уравнениях присутствует один и тот же член σ_0 , так как он отражает сопротивление движению дислокаций в теле зерна. Приравняв правые части уравнений (1) и (3), получаем зависимость $K_y/K_b = D^{-0.5}$.

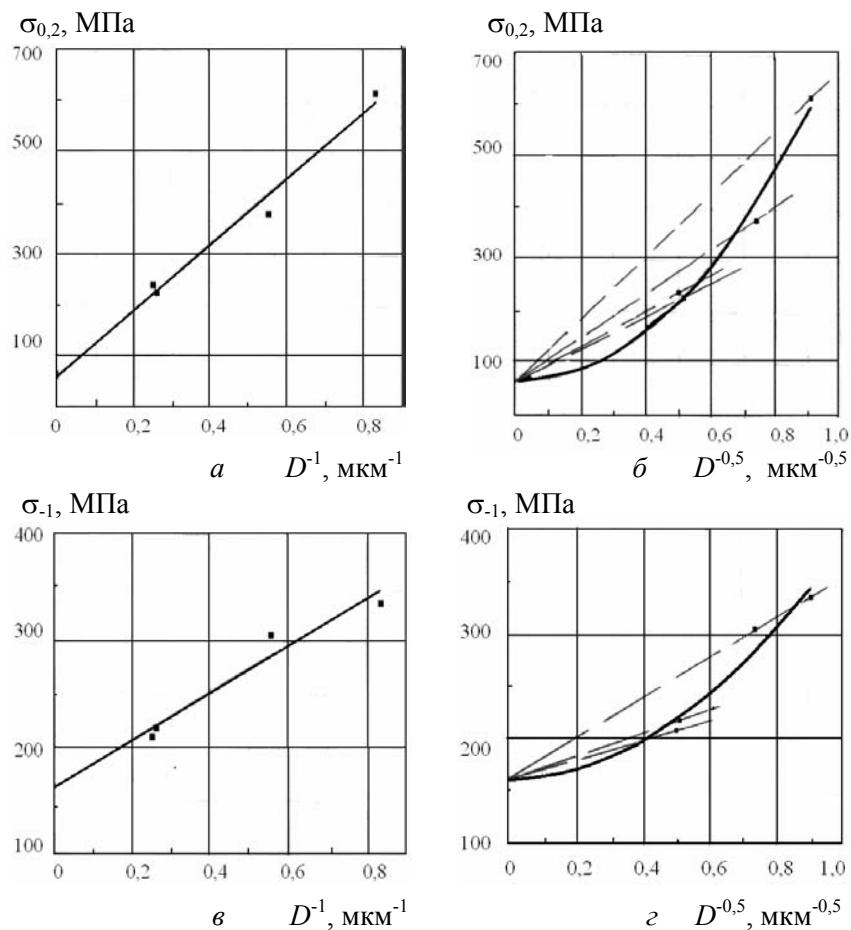


Рис. 2. Зависимости пределов текучести (*а*, *б*) и выносливости (*в*, *г*) поликристаллического материала Cu—NbC от параметров структуры D^{-1} и $D^{-0.5}$.

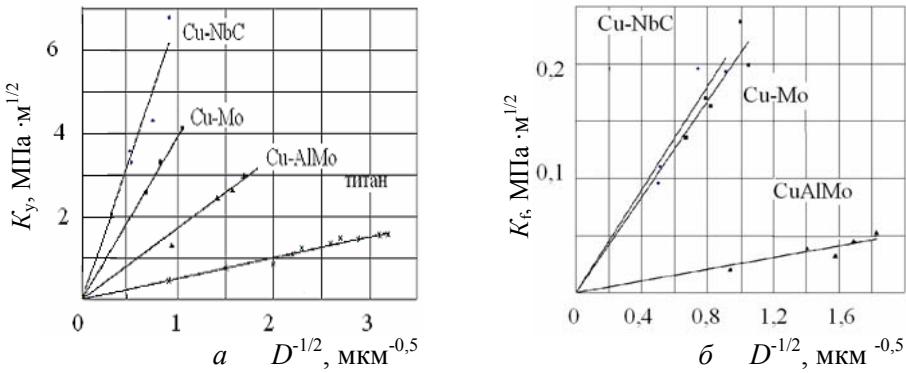


Рис. 3. Зависимости коэффициента уравнения Холла—Петча (*а*) и второго коэффициента уравнения типа Холла—Петча (*б*) от параметра структуры $D^{-1/2}$ исследованных материалов.

Для сравнения с нашими данными на рис. 3, *а* представлена зависимость K_y холоднодеформированного титана от среднего размера D дислокационной ячейки, полученная по данным работы [2]. Как видно, отмеченные в настоящей работе особенности подтверждаются и данными для титана.

Итак, в данной работе, как и в работах [1—5], установлено, что при уменьшении размеров зерна до субмикронных имеет место переход к зависимости, описываемой уравнением (3). Интерес представляет определение критического размера зерна D_{cr} , при котором происходит этот переход. Значение D_{cr} можно найти, приравняв зависимости (1) и (3). Полагая, что значение σ_0 в обоих уравнениях одно и то же, получим

$$D_{cr} = (K_b/K_y)^2. \quad (4)$$

По данным, приведенным на рис. 2, *а*, *в*, легко найти значения K_b , а для чистой меди можно принять $K_y = 0,11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$. Тогда для материалов Cu—NbC $D_{cr} = 34 \text{ мкм}$. Отметим, что исследуемый в работе диапазон размеров зерен составляет 4—0,3 мкм.

Очевидно, что при размерах зерен больше D_{cr} будет выполняться обычное уравнение Холла—Петча. Если предположить, что общая схема передачи скольжения через границу зерна, принятая для уравнения Холла—Петча, выполняется и при размерах зерен ниже критического, то можно получить связь между коэффициентами уравнений (1) и (3), а именно

$$K_y/K_b = D^{-0.5}. \quad (5)$$

Таким образом, оценка критических размеров зерен для исследованных материалов показала, что в изученном диапазоне их размеров хорошо выполняется зависимость (3), а при обработке экспериментальных данных в координатах уравнения Холла—Петча наблюдается существенное отклонение от прямой линии (см. рис. 2, *б*, *г*). Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что коэффициент K_y зависит от размера зерна. Действительно, как следует из рис. 3, зависимость (5) выполняется с высоким коэффициентом корреляции.

С физической точки зрения причиной такого поведения, по нашему мнению, является следующее обстоятельство. В соответствии с классичес-

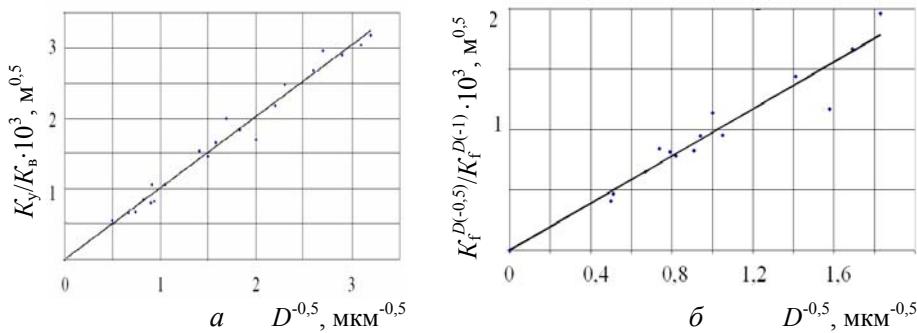


Рис. 4. Зависимости отношений K_y/K_b для предела текучести ($y = 1,0149x$, $R^2 = 0,9866$) (а) и $K_f^{D(-0,5)}/K_f^{D(-1)}$ для предела выносливости ($y = 0,9753x$, $R^2 = 0,9538$) (б) исследованных материалов от параметра структуры $D^{-1/2}$. R^2 — величина достоверности аппроксимации стандартной программы в Microsoft Office Excel.

кими представлениями, константа уравнения Холла—Петча $K_y = m\tau_s(r_s)^{0.5}$ (m — фактор ориентировки; τ_s — напряжение срабатывания дислокационного источника у вершины скопления; r_s — расстояние от вершины скопления до источника) не зависит от размера зерна. Однако с уменьшением D величина r_s приближается к границе зерна. При этом происходит срабатывание дислокационных источников не в теле зерна, а у его границы. Полагая, что и напряжение старта дислокационного источника $\tau_s = \alpha Gb/l$ и расстояние r_s при размерах зерен ниже критического становятся зависимыми от D ($l \sim D$, $r_s \sim D$), получим

$$K_y = \alpha m Gb/D^{1/2}. \quad (6)$$

Поскольку в экспериментальной зависимости (5) величина K_b постоянная, теоретическая зависимость (6) совпадает с ней при условии, что $K_b = \alpha m Gb$. Таким образом, можно теоретически рассчитать экспериментальный коэффициент K_b в уравнении (3).

Экспериментальная проверка этих выводов для исследованных в работе конденсированных поликристаллических материалов, а также известных из литературы данных подтверждает хорошее выполнение зависимости (5) как для предела текучести, так и для предела выносливости (рис. 4).

Из представленных данных следует, что переход от уравнения (1) к (3) имеет место не только для напряжения течения, что уже наблюдалось и обсуждалось в работах [1—5], но и для предела выносливости, что в данной работе получено впервые.

Выводы

Установлено, что для исследованных в работе материалов Cu—NbC, Cu—Mo (720 + 950 °C) и CuAl—Mo, полученных вакуумной конденсацией паровых потоков компонентов на горячую подложку, зависимости пределов текучести и выносливости от размера зерна (4—0,3 мкм) пропорциональны параметру структуры D^{-1} .

Показано, что уравнение Холла—Петча может быть применено в указанном диапазоне размеров зерен при условии, что коэффициент уравнения подчиняется уравнению $K_y = K_b D^{-0,5}$.

1. *Thompson A. W.* Substructure strengthening mechanisms // Met. Trans. — 1977. — 8A, No. 6. — P. 833—842.
2. *Sevillano J. G., Houtte P. van and Aernoudt E.* Large strain work hardening and textures // Progress in Material Science. — 1981. — 25. — P. 69—412.
3. *Трефилов В. И., Мусеев В. Ф., Печковский Э. П. и др.* Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Под ред. Трефилова В. И. — К.: Наук. думка, 1989. — 256 с.
4. *Фирстов С. А.* Особенности деформации и разрушения нанокристаллических материалов // Прогресивні матеріали і технології: У 2-х т. — К.: Академперіодика, 2003. — Т. 2. — 663 с.
5. *Firstov S. A., Rogul T. A., Marushko V. T., Sagaydak V. A.* Structure and microhardness of polycrystalline chromium produced by magnetron sputtering // Вопросы материаловедения. — 2003. — № 1. — С. 201—205.
6. *Андреевский Р. А., Глазер А. М.* Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. 1. Особенности структуры. Термодинамика. Фазовые равновесия. Кинетические явления // Физика металлов и металловедение. — 1999. — 88, № 1. — С. 50—73.
7. *Мовчан Б. А., Малащенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осажденные в вакууме. — К.: Наук. думка, 1983. — 285 с.
8. *Мартин Дж.* Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1983. — 167 с.
9. *Луговской Ю. Ф., Кузьменко В. А., Гречанюк Н. И. и др.* Влияние структуры и длительности циклического нагружения на сопротивление усталости дисперсно-упрочненных конденсированных материалов на основе меди. 1. Экспериментальные зависимости // Порошковая металлургия. — 1998. — № 3/4. — С. 93—100.
10. *Луговской Ю. Ф.* Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением // Проблемы спец. электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61—65.