

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ИХ РОЛЬ В ДЕФОРМАЦИОННОМ ПОВЕДЕНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Баранов Ю. В., Столяров В. В., Сахвалдзе Г. Ж.

Институт машиноведения РАН, Москва

Введение

Поверхностные эффекты [1–4] играют значительную роль в механическом поведении материалов. А.Ф. Иоффе в хрупких кристаллах NaCl наблюдал многократное повышение пластичности и прочности при деформации в воде за счет ускоренного растворения поверхностных слоев [1, 2]. П.А. Ребиндер обнаружил понижение прочности и пластифицирование поликристаллов при деформации в растворах органических поверхностно-активных веществ за счет их адсорбции [3, 4]. Природа обоих эффектов обусловлена снижением свободной поверхностной энергии твердого тела на весьма незначительную величину – порядка нескольких десятков эрг/см². Механизм пластифицирующего действия среды авторы [3, 4] связывают с облегчением зарождения и выхода дислокаций на поверхность кристалла в результате адсорбции молекул поверхностно-активных веществ [5–11]. Наконец, Roscoe R. [12, 13] на монокристаллах кадмия обнаружил, что увеличение толщины окисной пленки до нескольких сотен атомных слоев приводит к увеличению критического напряжения сдвига в два раза, а ее удаление – к снижению критического напряжения сдвига до исходной величины. Механизм явления связан с препятствием пленки выходу дислокаций на поверхность кристаллов. В результате скопления дефектов и концентрации напряжений в приповерхностном слое материала повышается напряжения сдвига.

Ниже рассматривается влияние удаления поверхностных слоев в процессе статического растяжения на механические свойства монокристаллов вольфрама.

Экспериментальные результаты

Деформирование монокристаллов вольфрама основных кристаллографических ориентаций [001], [101], [111] осуществляли на испытательной машине Инстрон ТТ-Д-10Т, в специальных полировочных ваннах. Полировка монокристаллов в процессе деформирования осуществлялась непрерывно и кратковременно.

Скорость деформации при растяжении составляла $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. На рис.1. в координатах – истинное напряжение S – относительное суждение ψ , представлены графики, характеризующие поведение монокристаллов вольфрама, деформируемых вдоль оси [001] при действии электрополировки (кривые 2–5) и без нее (кривая 1). Кривые 3,4,5 соответствуют монокристаллам, растягиваемым при непрерывном удалении металла с поверхности деформируемого образца. Скорость полировки составляет, соответственно, 0,08; 0,16; 0,24 мкм/с. Кривая 1 получена при растяжении монокристаллов обычным образом, без полировки. Кривая 2 характеризует поведение металла при периодическом включении и выключении полировки (скорости удаления металла с поверхности соответствуют 0,08, 0,16; 0,24 мкм/с).

На рис.2 представлена зависимость напряжений от относительного суждения при обычном растяжении монокристалла вдоль оси [001] и при переменном воздействии полировки со скоростью удаления металла 0,16 мкм/с.

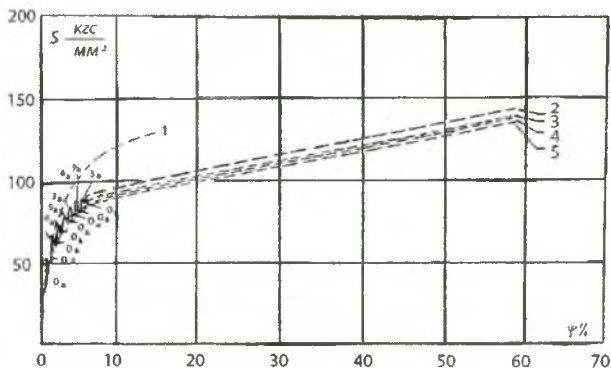


Рис. 1. Истинные кривые деформации монокристаллов вольфрама, растягиваемых вдоль оси [001] в процессе полировки (2-5) и без нее:

1 - $j = 0$ а/см²;
 3 - $j = 1$ а/см²;
 4 - $j = 2$ а/см²;
 5 - $j = 3$ а/см²;
 2 - включение и выключение $j = 1, 2, 3$ а/см²

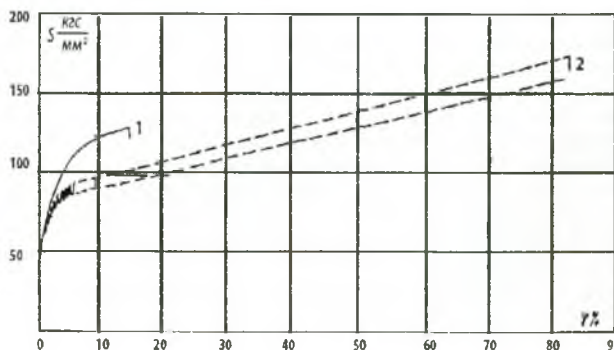


Рис. 2. Зависимость истинных напряжений от относительного сужения при растяжении монокристаллов $W[001]$ без полировки (1) и с кратковременной полировкой, $V_{\text{пол.}} = 0,16$ мкм/с: 1 - $j = 0$ а/см²; 2 - включение и выключение $j = 2$ а/см².

Из рисунков следует, что как непрерывная, так и кратковременная полировка в процессе растяжения монокристаллов приводит к значительным изменениям деформационной кривой. Электрополировка снижает напряжения течения и увеличивает более чем в 6 раз относительное сужение при разрушении. В табл. 1. приведены значения истинных пределов пропорциональности $S_{п.п}$ и прочности S_0 , относительного сужения ψ_p и относительной деформации ϵ_p , при разрушении для монокристаллов вольфрама в зависимости от скорости полировки в процессе растяжения.

Увеличение скорости удаления металла с поверхности растягиваемых вдоль оси [001] монокристаллов от 0 до 0,24 мкм/сек приводит к снижению $S_{п.п}$ от 250 до 168 МПа и S_0 - от 1260 до 770 МПа. При этом резко возрастают характеристики пластичности. Относительное сужение увеличивается, например, с 15,1% при скорости полировки, равной 0, до 90% при скорости полировки 0,24 мкм/с, а относительное удлинение возрастает при этом с 16,6% до 230%.

Изменяется и вид разрушения монокристаллов в зависимости от условий растяжения. На рис.3 изображены монокристаллы вольфрама, растянутые вдоль оси роста [001] до разрушения обычным образом (1) и в процессе электрополировки со скоростью удаления металла с поверхности 0,16 мкм/с (2).

Таблица 1. Влияние электрополировки в процессе растяжения на механические свойства монокристаллов вольфрама различных ориентаций

Кристаллографические ориентировки кристаллов (ось растяжения)	[001]			[101]			[111]		
$V_{\text{пол}}$, мкм/с	0	0,16	0,24	0	0,08	0,16	0	0,08	0,16
$S_{\text{пл}}$, МПа	250	175	168	729	556	452	507	362	342
$S_{\text{вп}}$, МПа	1260	850	770	915	622	601	1230	878	818
ε_p , %	16,6	172,0	231,0	42,2	462,2	123,0	15,5	30,5	44,5
ψ_p , %	15,1	82,5	90,0	42,2	99,0	70,7	14,2	26,0	35,4
j , а/см ²	0	2	3	0	1	2	0	1	2

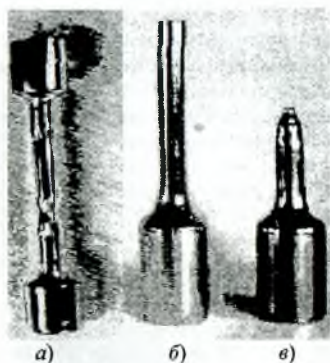


Рис. 3. Монокристаллы вольфрама [001], деформированные растяжением в процессе полировки (а, в) и без нее (б)

Хорошо видно, что монокристалл, деформированный обычным образом, разрушился хрупко, по плоскости скола (001), причем величина относительного сужения невелика. Монокристалл, растягиваемый в процессе полировки, разрушился с образованием "шейки", при этом относительное сужение в момент разрушения составляло 83%. За все время растяжения с поверхности этого образца электрополировкой был удален слой 0,1 мм. При переменном включении и выключении полировки с заданной скоростью полировки, например 0,16 мкм/с (ток 6А), рис.2, хорошо видно, что по мере увеличения деформации величина скачкообразного снижения напряжения течения растет, но, достигнув максимальной величины в области предела прочности, далее заметно не меняется.

На рис.4 представлены графики деформации монокристаллов вольфрама, растягиваемых вдоль оси роста [111] без полировки (1) и с полировкой в процессе деформирования при скорости полировки, 0,08 мкм/с (кривая 2) и 0,16 мкм/с (кривая 3). На рис.5 представлена аналогичная деформационная кривая, но при кратковременной полировке со скоростями полировки 0,08; 0,16; 0,24 мкм/с.

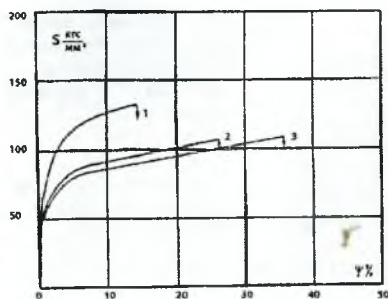


Рис. 4. Истинные кривые деформации монокристаллов W , растягиваемых вдоль оси [111] без полировки (1) и с полировкой в процессе деформирования (2,3). $V_{\text{пол}}(2) = 0,08$ мкм/с; $V_{\text{пол}}(3) = 0,16$ мкм/с.

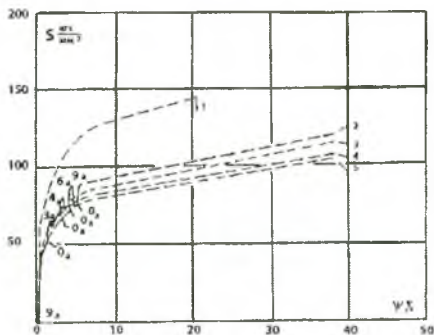


Рис. 5. Истинные кривые деформации монокристаллов W , растягиваемых вдоль оси $[111]$ в процессе полировки при скоростях $V_{\text{пол.}}(1) = 0$; $V_{\text{пол.}}(3) = 0,08$ мкм/с, $V_{\text{пол.}}(4) = 0,16$ мкм/с, $V_{\text{пол.}}(5) = 0,24$ мкм/с, $V_{\text{пол.}}(2)$ – кратковременная полировка

На рис. 6 и 7 представлены зависимости истинных напряжений от относительных сужений при электрополировке и без нее для монокристаллов, растягиваемых вдоль оси $[101]$. На кривых деформации, полученных без полировки в процессе растягивания, хорошо виден "зуб текучести". Непрерывная полировка образца в процессе нагружения приводит к исчезновению "зуба текучести" и сглаживает кривую деформации.

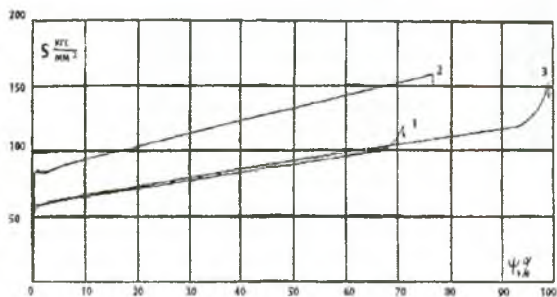


Рис. 6. Истинные кривые деформации монокристаллов вольфрама, растягиваемых вдоль оси $[101]$ без электрополировки (1), (2) и в процессе электрополировки (3), (4); $V_{\text{пол.}}(3) = 0,08$ мкм/сек, $V_{\text{пол.}}(4) = 0,16$ мкм/сек.

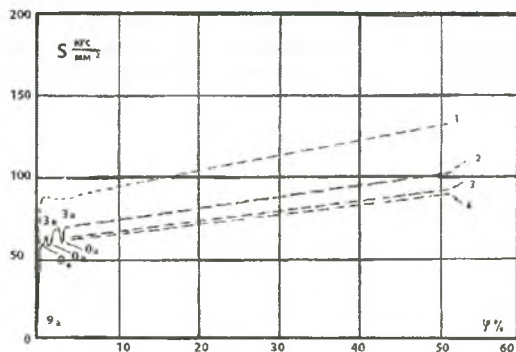


Рис. 7. Истинные кривые деформации монокристаллов W , растягиваемых вдоль оси $[101]$ при скорости полировки: 1 – 0; 3 – 0,08; 4 – 0,16 мкм/сек; 2 – кратковременная полировка со скоростями 0; 0,08 и 0,16 мкм/с.

Из данных табл. 1 следует, что наибольшее уменьшение прочностных характеристик S_{m1} и S_0 происходит на начальном этапе увеличения скорости полировки $V_{пол}$, то есть при сравнительно небольших скоростях удаления металла с поверхности деформируемого образца. При дальнейшем увеличении $V_{пол}$ уменьшение S_{m1} и S_0 не столь значительно. Например, при растяжении W [001] увеличение $V_{пол}$ от 0 до 0,16 мкм/с вызывает уменьшение S_{m1} на 75 МПа, тогда как при дальнейшем возрастании $V_{пол}$ до 0,24 мкм/с S_{m1} снизилось только на 7 МПа. Аналогичный эффект проявляется для монокристаллов вольфрама всех ориентаций. Этот факт можно объяснить тем, что наиболее искаженный поверхностный слой, имеющий конечную скорость образования, полностью удаляется при определенной $V_{пол}$, т.е. когда достигается некоторое равновесие между скоростью образования этого слоя и скоростью его удаления.

Выводы

1. Удаление поверхностных слоев монокристаллов вольфрама в процессе статического деформирования приводит к уменьшению скорости упрочнения.
2. Пределы пропорциональности и напряжения течения уменьшаются при полировке кристаллов в процессе деформации.
3. Для данной скорости деформации существует критическая скорость полировки, при достижении которой дальнейшее снижение пределов пропорциональности и прочности происходит менее интенсивно.
4. Кратковременная полировка в процессе деформации приводит, в зависимости от соотношения между скоростью деформации и скоростью полировки, либо к плавному, либо к скачкообразному уменьшению напряжения деформирования.
5. При постоянной степени деформации снижение напряжения тем больше, чем больше скорость удаления поверхностного слоя.
6. Характер кривой «напряжения – деформация» при полировке определяется отношением скорости деформирования к скорости полировки, то есть, соотношением скоростей выхода дислокаций на поверхность кристалла и удаления металла с поверхности.
7. Спад напряжения при кратковременной полировке деформируемого кристалла возрастает с увеличением деформации, стремясь к постоянной величине.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 07-08-00263

Список литературы

1. Иоффе А.Ф. Физика кристаллов, Л.; М.: ГосНТИ, 1929. – 90 с.
2. Иоффе А.Ф., Кирпичева М.В., Левитская М.А., Успехи физических наук, 1967. Т.93. №2. 303–314.
3. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д., М.: Наука, (1966) 120 с.
4. Лихтман В.И., Рибендер П.А., Карпенко Г.В. М.: Наука, 1954. – 115 с.
5. Лихтман В.И., Рибендер П.А. Изв.АН СССР. Серия физическая. Т.17. 3 (1953) 313–332.
6. Рибендер П.А., Лихтман В.И., Качанова Л.А. ДАН СССР. 1956. Т.3. 6. 1278–1281.
7. Шукин Е.Д., Рибендер П.А. Коллоидный журнал. 1958. Т.XX. №5. С. 645–654.
8. Лихтман В.И., Шукин Е.Д. Успехи химии. 1960. Т.29. №10. С. 1260–1284.
9. Бартенев Г., Юдина И., Рибендер П., Коллоидный журнал, 1958. XX, 5. 655–664.
10. Залкин В.М. Физико-химическая механика материалов, Т.4. (1968) 1. 27–29.
11. Перцев Н.В., Шукин Е.Д., Физика и химия обработки материалов, 2. (1970) 60–82.
12. Roscoe R., Nature. 1934. V.133. P. 912–916.
13. S. Harper, A.N. Cottrell, Proc of the Physical Society, B, May. 316. (1950) 380–391.