

Член-корреспондент АН СССР Е. М. САВИЦКИЙ, Г. С. БУРХАНОВ,
В. А. КУЗЬМИЩЕВ

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ МОЛИБДЕНА

В настоящей работе изучались особенности изменения тонкой структуры при прокатке монокристаллов молибдена различной кристаллографической ориентации. Объектами исследования были образцы в форме параллелепипедов ($4 \times 5 \times 20$ мм), вырезанные из зонно-рафинированных монокристаллов молибдена. Было изучено изменение тонкой структуры монокристаллов молибдена, плоскость прокатки которых соответствовала в одном случае плоскости (100), а в другом (111); направление прокатки в обоих случаях [110]. Образцы подвергались холодной прокатке с обжатиями 10, 25, 50 и 90%. Тонкая структура прокатанных монокристаллов исследовалась методами металлографического и рентгеновского топографического анализа* (¹). Проводилось также измерение микротвердости прокатанных образцов.

С точки зрения сохранения монокристаллической структуры при прокатке наиболее благоприятной, как и для вольфрама (²), оказалась кристаллографическая система (100) [110], совпадающая с текстурой прокатки о.д.к. металлов. При данной ориентировке монокристаллическая структура не нарушается даже после 90% деформации (рис. 2б). В этом случае создаются условия, обеспечивающие минимальный поворот и кручение кристаллографических плоскостей скольжения при деформации и, следовательно, минимальные искажения кристаллической решетки.

Таблица 1

Данные топограмм

Ориентация системы прокатки	% деформации	Поперек прокатки				Вдоль прокатки				Плотность дислокаций, 10^4 см^{-2}
		Размер субзерен, мм		Разориентация субзерен		Размер субзерен, мм		Разориентация субзерен		
		по-рядок	2 по-рядок	1 порядок	2 порядок	1 по-рядок	2 по-рядок	1 порядок	2 порядок	
(100)	10	0,40	0,10	10'—20'	2'—5'	0,50	0,10	10'—15'	2'—5'	2
	25	0,25	0,05	30'—40'	10'	0,35	0,05	20'—30'	2'—5'	5
	50					0,35	0,05	30'—50'	5'—5'	10
[110]	90	0,20	0,05	1°—3°	20'—30'	0,30	0,05	1°—1,5°	10'	
	10	0,35	0,05	20'—30'	2'—5'	0,40	0,05	15'—25'	2'—5'	4
(111)	25	0,20	0,05	2°—4°	2'—5'	0,25	0,05	1°—2°	2'—5'	8
[110]	50	0,20		3°—6°		0,25		2°—5°		
	90			5°—15°				5°—15°		

В табл. 1 приведено последовательное изменение угловой разориентировки и величины субзерен, а также средней плотности дислокаций при прокатке монокристаллов молибдена кристаллографической системы (100) [110]. Эти данные получены на основе расчета топограмм. Средняя плотность дислокаций подсчитана по границам субзерен, исходя из

* Рентгеновская топография проводилась на камере типа ДМРК-3, разработанной под руководством А. А. Русакова и В. Н. Яльцева.

представления о преобладании краевых дислокаций с вектором Бюргерса $b = a/2 [111]$ (³).

С увеличением степени деформации происходит дробление субзерен, увеличение их угловой разориентировки и средней плотности дислокаций (табл. 1). Установлена анизотропия разориентировки субзерен, прокатанных монокристаллов молибдена. Максимальная разориентировка наблюдается в плоскости, перпендикулярной направлению прокатки, минимальная — в плоскости прокатки (рис. 1).

Субзерна под действием приложенных напряжений занимают положение, отвечающее минимуму энергии деформации. Этому положению для о.ц.к. металлов соответствует текстура прокатки (100) $[110]$. Поэтому наряду с дроблением и вытягиванием субзерен 1-го порядка вдоль направления прокатки происходит разориентация субзерен кручением около направления прокатки. На топограммах такому повороту соответствует появление светлых полос, параллельных направлению прокатки (рис. 2а). На поверхности образца образуется структура из параллельных субзерен 1-го порядка. Уже после малых степеней обжатия при прокатке на плоскости прокатки образуется ряд вытянутых вдоль прокатки субзерен в виде «лент», дезориентированных друг относительно друга (рис. 1).

С ростом обжатия эти «ленты» укрупняются, их взаимная разориентировка растёт, сами «ленты» становятся извилистыми и, в свою очередь, стремятся образовать более тонкую, «ленточную» структуру (рис. 2а — в). Поперечное сечение субзерен, как видно из топограмм, снятых с торцевой поверхности образца, имеет ячеистую форму (рис. 2а). С ростом деформации происходит дробление и размытие ячеистой структуры. Извилистые границы субзерен в процессе деформации выпрямляются и располагаются соответственно действующим плоскостям скольжения в направлениях $[100]$ и $[110]$ (рис. 2г, д). Одновременно происходит постепенное размытие субграниц, не отвечающих указанным направлениям. Рентгеновский анализ по Лауэ показывает постепенное увеличение внутренних напряжений с ростом степени деформации.

После деформации больших степеней в структуре на плоскости прокатки (100) наблюдается образование цепочек ямок травления в виде «хвостов» (рис. 3а, б). Ямки травления наползают друг на друга, постепенно уменьшаясь к концу «хвоста». По-видимому, такой «хвост» является местом выхода на поверхность шлифа пучка дислокаций, располагающихся под разными углами поверхности. Максимальные размеры ямки травления отвечают линии дислокации, располагающейся примерно перпендикулярно к поверхности; с уменьшением угла выхода дислокаций к поверхности размер ямок травления уменьшается. Образование таких пучков дислокаций, по-видимому, связано с переползанием дислокаций при развороте субзерен. Пластическая деформация монокристаллов молибдена вызывает появление в их структуре своеобразной «сыпи» в виде очень мелких точек, равномерно рассеянных по шлифу (рис. 3а, б). Этот фон из точек усиливался с увеличением степени деформации. По внешнему виду он напоминает структуру облученных металлических кристаллов. Можно предположить, что появление такого фона при дефор-

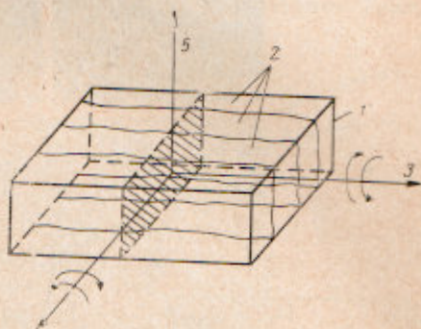


Рис. 1. Схема кручения субзерен относительно кристаллографических направлений при прокатке и образование разориентированных макрообластей («лент»): 1 — кристалл, 2 — субзерна, 3 — направление прокатки, 4 — направление, перпендикулярное плоскости прокатки, 5 — нормаль к плоскости прокатки

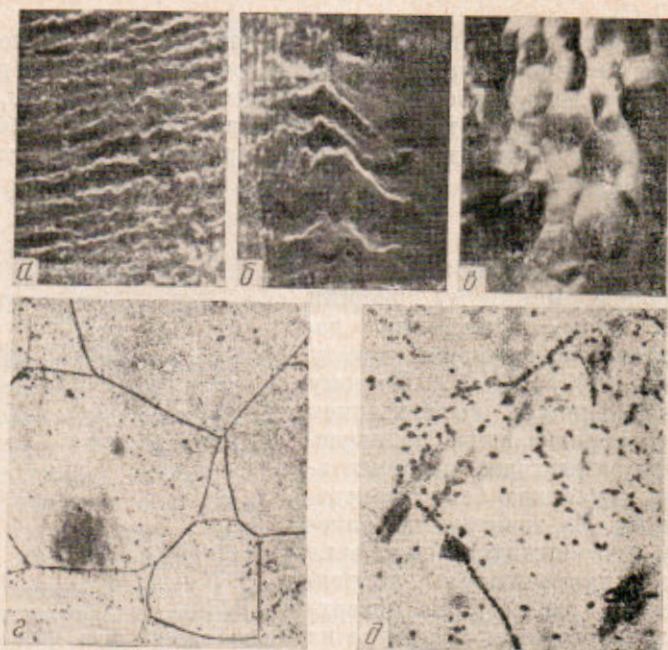


Рис. 2. Субструктура монокристаллов, возникающая в результате вытягивания и поворота субзерен 1-го порядка в плоскости прокатки при обжатиях 25% (а), 90% (б) и в плоскости, перпендикулярной направлению прокатки, при обжатии 25% (в). SiK_α -излучение, 25 $\times$. Спрямление и ориентация субзеренных границ в направлениях [100] и [110]. Обжатие 25% (г) и 50% (д), 200 $\times$

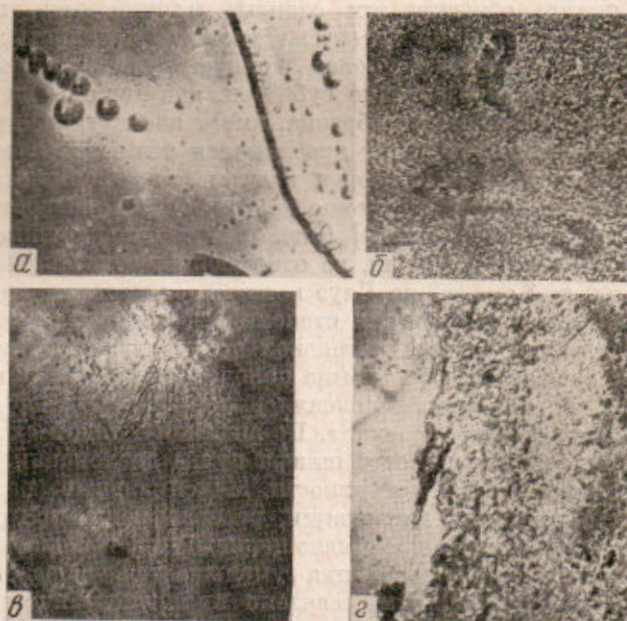


Рис. 3. Образование цепочек ямок травления в виде «хвостов» и точечного фона при степени обжатия 90%, 1000 $\times$: а — исходная структура, б — структура после 90% деформации. Сложное скольжение и образование поликристалла в результате деформации монокристалла по системе (111) [110]: в — структура сложного скольжения после 50% деформации, г — образование поликристалла после 90% деформации

мации является результатом концентрации точечных дефектов (скоплений, вакансий, примесей), как это имеет место при облучении.

При прокатке монокристаллов молибдена с ориентацией (111) [110] рассмотренные выше структурные изменения происходят значительно быстрее, чем в случае ориентации (100) [110]. Уже при малых степенях деформации у образцов с ориентировкой (111) [110] появляются четкие следы скольжения, число которых увеличивается с дальнейшим ростом деформации. При 50% деформации возникает сложное скольжение (рис. 3в), увеличивающее степень искажения кристаллической решетки, что и приводит в дальнейшем (90% деформации) к разрушению монокристаллической структуры и образованию поликристаллов (рис. 3г).

Измерение микротвердости образцов монокристаллического молибдена после прокатки с обжатием разной степени в общем отражает рассмотренную картину структурных изменений (рис. 4). На образцах, прокатанных с благоприятной для сохранения монокристаллической структуры кристаллографической ориентировкой (100) [110], твердость возрастает значительно меньше с увеличением степени пластической деформации, чем на образцах с ориентацией (111) [110]. Это свидетельствует о значительно меньшем количестве дефектов, вносимом деформацией в образцы с ориентировкой (100) [110].

Таким образом, при пластической деформации монокристаллов молибдена, наряду с вытягиванием и дроблением субзерен, происходит разворот, в результате которого субзерна занимают положение, отвечающее минимуму энергии деформации. Такой разворот субзерен вызывает анизотропию угловой разориентировки их в пространстве, которая достигает 100%.

Упрочнение монокристаллов молибдена, вызванное разориентировкой и дроблением субзерен в процессе пластической деформации, определяется исходной кристаллографической ориентировкой образцов. Для образцов с ориентировкой (100) [110] упрочнение достигает 25–30%, а для (111) [110] 50–60% при 90% деформации.

Кристаллографическая ориентировка (100) [110], отвечающая основной текстуре прокатки о.д.к. металлов, обеспечивает сохранение монокристаллической структуры вплоть до 90% деформации.

Прокатка ориентированных монокристаллов может быть одним из путей управления структурой и свойствами металлических материалов.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
15 VI 1971

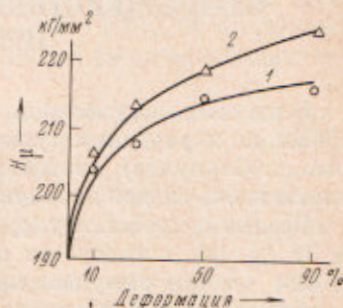


Рис. 4. Зависимость анизотропии микротвердости от степени пластической деформации при прокатке монокристаллов молибдена: 1 — (100) [110], 2 — (111) [110]

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. А. Русаков, Рентгенография металлов, ч. II, М., 1969, стр. 183. ² Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов и др., Сборн. Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, «Наука», 1969, стр. 145. ³ А. Тейлор, Рентгеновская металлография, М., 1965, стр. 410.