

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. И. ТРЕФИЛОВ, | Д. Д. АБАНИН, | А. И. ЕВСТЮХИН,
В. П. МАСЛОВ, А. Н. РАКИЦКИЙ

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ХРОМА
ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

(Представлено академиком Н. Н. Рыкалиным 1 II 1973)

Хром является одним из наиболее хладноломких в ряду переходных металлов. Исследование физической природы хрупкости хрома показало, что температура перехода к хрупкому разрушению T_x в значительной мере зависит от чистоты и структурного состояния металла (^{1, 2}).

В работах (^{3, 4}) было показано, что высокочистые W и Mo в монокристальном состоянии сохраняют пластичность до 77 и 4,2° К соответственно, поэтому представляло интерес изучение механических свойств монокристаллического хрома максимальной чистоты. Необходимо отметить, что получение высокочистых и достаточно совершенных монокристаллов хрома весьма сложно. Так, в исследованных до сих пор кристаллах хрома содержание примесей находилось в пределах 1—5·10⁻³ вес.%, а отношение

Таблица 1
Масс-спектральный анализ
монокристаллов

Элемент	Содержание ат.р.т.	Элемент	Содержание ат.р.т.
Ni	< 50	K	0,8
Fe	< 50	Mo	0,5
Cu	20	Mn	0,3
V	15	Si	1,0
Ti	7,0	S	1,5
Ca	6,0	P	0,2
Ta	2,0	Br	2,5
Nb	1,5	F	3,0
Na	1,0	J	1,0

электросопротивлений, измеренных при комнатной температуре и 4,2° К, не превышало 253 (⁵⁻⁸).

Авторами для получения монокристаллов хрома высокой чистоты использовался метод осаждения из парогазовой фазы в укрупненном ашпарте типа «горячая нить». Процесс проводили в две стадии. В качестве исходного сырья для рафинирования использовали стружку из сплава Cr+0,5% La. Добавка редкоземельных элементов, как было показано ранее (¹⁰), позволяет дополнительно повысить чистоту йодидного хрома по содержанию примесей внедрения. На первой стадии производили только очистку металла от примесей, а на второй — очистку и выращивание монокристаллов. При достаточно длительном рафинировании (~100 час.) удалось получить монокристаллы кубической огранки с размером ребер до 12 мм.

Данные масс-спектрального анализа и анализа примесей внедрения представлены в табл. 1 и 2. Отношение электросопротивлений, измеренных при 300 и 4,2° К, для полученных монокристаллов равнялось 1000—1100.

Механические свойства монокристаллов определяли при испытании на изгиб по трехточечной схеме с записью диаграммы нагрузления (нагрузка — стрела прогиба), скорость перемещения изгибающего ножа составляла 2 мм/мин. Образцы для испытаний размером 0,6×2,0×(12—15) мм³ вырезались методом электроискровой резки. Затем образцы подвергались шлифовке и электрополировке для удаления поврежденного слоя. Учитывая возможность появления в кристаллах в процессе роста внутренних

напряжений, образцы перед испытанием подвергались отжигу в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. при 950°C в течение двух часов с последующим медленным охлаждением. Испытания проводили на образцах, имеющих ориентировку $\langle 110 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$.

Дислокационную структуру монокристаллов исследовали методом ямок травления. Плотность дислокаций в кристаллах не превышала $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ и субструктурных границ не наблюдалось.

На рис. 1 представлено изменение угла загиба образцов до разрушения в зависимости от температуры испытаний. Как видно, образцы хрома, имеющие ориентировку $\langle 110 \rangle$, выдерживают изгиб на 180° до -100°C . С понижением температуры до -196° угол загиба уменьшается и при температуре жидкого азота составляет $75-90^{\circ}$. Эти результаты интересно

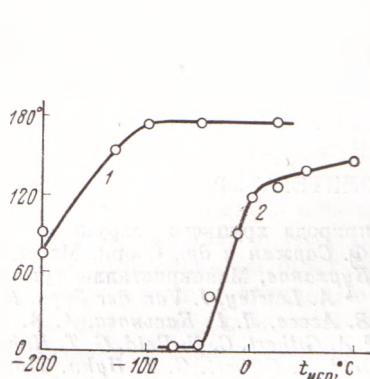


Рис. 1

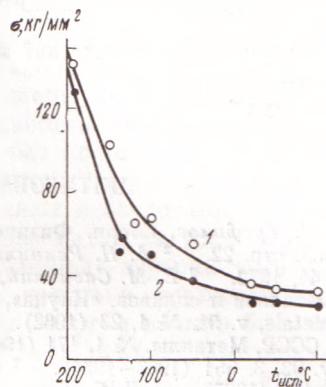


Рис. 2

Рис. 1. Пластичность монокристаллов хрома при испытании на изгиб: 1 — направление $\langle 110 \rangle$, 2 — направление $\langle 100 \rangle$; по оси ординат отложен угол загиба образцов

Рис. 2. Зависимость предела пропорциональности σ от температуры для направления $\langle 110 \rangle$. Суммарное содержание примесей внедрения ($\text{N}, \text{C}, \text{O}, \text{H}$) в кристаллах $\approx 3 \cdot 10^{-3}$ вес. % (1), $< 1 \cdot 10^{-3}$ вес. % (2)

сравнить с литературными данными для монокристаллов хрома более низкой чистоты (⁵⁻⁹).

В соответствии с данными (^{6, 7}) монокристаллы хрома, содержащие $\text{N}, \text{C}, \text{O}$ в количестве $0,003-0,005\%$, при охлаждении ниже -78°C становились совершенно хрупкими. Снижение концентрации примесей элементов внедрения до уровня $0,001-0,002\%$ приводило к снижению температуры хрупкого перехода до -100°C (⁸). При содержании азота, кислорода $<0,001\%$ и углерода $\sim 0,002\%$ монокристаллы остаются пластичными до $(-130-150)^{\circ}\text{C}$ (⁹). Таким образом, подтверждается сильная зависимость низкотемпературной пластичности хрома от содержания в нем элементов внедрения. У ряда образцов отмечалось хрупкое разрушение при весьма малых степенях деформации и при этом на поверхности наблюдались царапины. По-видимому, монокристаллы хрома очень чувствительны к надрезу. Разрушение надрезанных образцов происходило по плоскостям спайности $\{001\}$, что отмечалось и в работах (⁵⁻⁸).

В работах (^{5, 8, 11}) обнаружена резкая анизотропия механических свойств кристаллов хрома. Авторами определена температура хрупкого перехода для наиболее хрупкого направления $\langle 001 \rangle$. Как видно из рис. 1,

Таблица 2

Содержание элементов внедрения

Элемент	Содержание, вес. %
N	$< 0,001$
O	$< 0,001$
C	$< 0,001$
H	0,0001

кристаллы хрома, имеющие такую ориентировку, разрушались хрупко уже при охлаждении до -50°C . По данным (⁵, ⁸) кристаллы хрома в направлении <001> обладают максимальным напряжением сдвига при сжатии и высокой микротвердостью (¹¹).

На монокристаллах с ориентировкой <110> была исследована температурная зависимость предела пропорциональности σ .

Как видно из рис. 2, для монокристаллов хрома такой чистоты характерна резкая зависимость σ от температуры. Важно отметить, что повышение чистоты монокристаллов приводит к заметному снижению предела пропорциональности в интервале температур от -120 до $+100^{\circ}\text{C}$. При температуре жидкого азота относительная величина разупрочнения при повышении чистоты несомненно уменьшается при сравнении с более высокими температурами деформации.

Московский инженерно-физический институт

Поступило

Институт металлофизики

1 II 1973

Академия наук УССР

Киев

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Трефилов, Сборн. Физическая природа хрупкого разрушения металлов, Киев, 1965, стр. 22. ² А. Н. Ракицкий, Т. Ф. Саржан и др., Сборн. Металлофизика, Киев, в. 44, 1972. ³ Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов, Монокристаллы тугоплавких и редких металлов и сплавов, «Наука», 1972. ⁴ A. Lawley, J. Van der Sype, R. Maddin, J. Inst. Metals, v. 91, № 1, 23 (1962). ⁵ Н. В. Агеев, Л. Г. Каськова, А. А. Бабареко, Изв. АН СССР, Металлы, № 1, 171 (1969). ⁶ A. Gilbert, C. N. Reid, G. T. Hahn, J. Inst. Metals, v. 92, 3, 551 (1963–1964). ⁷ C. N. Reid, A. Gilbert, G. T. Hahn, Trans. AIME, v. 239, 4, 467 (1967). ⁸ Д. Е. Кратчли, С. Н. Рейд, Сборн. Новые тугоплавкие металлические материалы, М., 1971, стр. 27. ⁹ Д. Д. Абанин, А. И. Евстиюхин и др., Изв. АН СССР, Металлы, № 1, 143 (1974). ¹⁰ Д. Д. Абанин, А. И. Евстиюхин и др., В кн. Металлургия и металловедение чистых металлов, М., в. 10, 1972, стр. 43. ¹¹ D. G. Alexander, O. N. Carlson, Trans. AIME, v. 245, 12, 2592 (1969).