

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. Рыкалинным 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 (<sup>1, 2</sup>).

В работах (<sup>3, 4</sup>) было показано, что высокочистые W и Mo в монокристаллическом 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  $1-5 \cdot 10^{-3}$  вес.%, а отношение

Таблица 1  
Масс-спектральный анализ  
монокристаллов

Элемент	Содержание ат.р.р.т.	Элемент	Содержание ат.р.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 (<sup>5-8</sup>).

Авторами для получения монокристаллов хрома высокой чистоты использовался метод осаждения из парогазовой фазы в укрупненном аппарате 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 (<sup>10</sup>), позволяет дополнительно повысить чистоту йодидного хрома по содержанию примесей внедрения. На первой стадии производили только очистку металла от примесей, а на вто-

рой — 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 нагружения (нагрузка — стрела прогиба), скорость перемещения изгибающего ножа составляла 2 мм/мин. Образцы для испытаний размером  $0,6 \times 2,0 \times (12-15)$  мм<sup>3</sup> 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  $950^\circ\text{C}$  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  $180^\circ$  до  $-100^\circ\text{C}$ . С понижением температуры до  $-196^\circ$  угол загиба уменьшается и при температуре жидкого азота составляет  $75-90^\circ$ . Эти результаты интересно

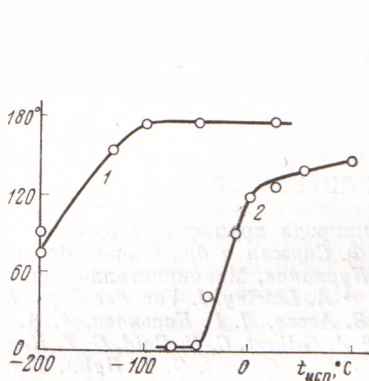


Рис. 1

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

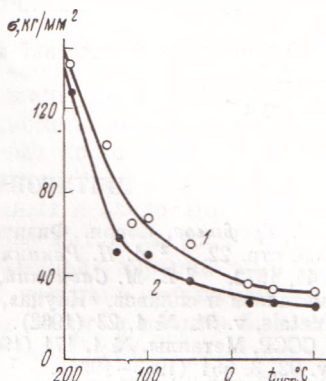


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость предела пропорциональности  $\sigma$  от температуры для направления  $\langle 110 \rangle$ . Суммарное содержание примесей внедрения (N, C, O, 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 <sup>(5-9)</sup>.

В соответствии с данными <sup>(6,7)</sup> монокристаллы хрома, содержащие N, C, O в количестве 0,003—0,005 %, при охлаждении ниже  $-78^\circ\text{C}$  становились совершенно хрупкими. Снижение концентрации примесей элементов внедрения до уровня 0,001—0,002 % приводило к снижению температуры хрупкого перехода до  $-100^\circ\text{C}$  <sup>(8)</sup>. При содержании азота, кислорода  $< 0,001\%$  и углерода  $\sim 0,002\%$  монокристаллы остаются пластичными до  $-(130-150)^\circ\text{C}$  <sup>(9)</sup>. 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 <sup>(5-9)</sup>.

В работах <sup>(5,8,11)</sup> 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  $-50^{\circ}\text{C}$ . По данным (<sup>5</sup>, <sup>6</sup>) кристаллы хрома в направлении  $\langle 001 \rangle$  обладают максимальным напряжением сдвига при сжатии и высокой микротвердостью (<sup>11</sup>).

На монокристаллах с ориентировкой  $\langle 110 \rangle$  была исследована температурная зависимость предела пропорциональности  $\sigma$ .

Как видно из рис. 2, для монокристаллов хрома такой чистоты характерна резкая зависимость  $\sigma$  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

Академии наук УССР

Киев

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

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