

рактрно по пластичных М. В конце этого участка наступает разрушение (точка С).

Сопротивление М. воздействию внеш. механич. сил описывается модулями упругости. Характерный порядок их величин для М. $\sim 10^{12}$ дин/см² (10^{11} Н/м²), различные компоненты тензора модулей упругости одного М. отличаются в неск. раз, а у разных М. могут отличаться в десятки раз. Поликристаллы при отсутствии *текстуры* в упругом отношении изотропны, и для описания их механич. свойств достаточно двух модулей, напр. модуля Юнга *E* и модуля сдвига *G* (табл. 9).

Т а б л. 9. — Модули упругости *E* и модули сдвига *G* (в Н/м²) для металлических монокристаллов и поликристаллов

Металл	$E_{(100)} \times 10^{-9}$	$E_{(111)} \times 10^{-9}$	$E \cdot 10^{-9}$ (поликристалл)	$G_{(100)} \times 10^{-9}$	$G \cdot 10^{-9}$ (поликристалл)
Na	—	—	9,1	—	3,5
Al	64,1	77,4	71,9	19,0	27,2
Ti	—	—	108,0	—	40,6
Fe	132,0	277,0	217,0	113,0	84,7
Cu	68,0	210,0	125,0	76,7	46,4
Au	—	—	80,2	—	28,2
Pb	11,0	39,6	16,6	14,7	5,7
Zn	—	—	94,0	—	37,3
W	397,0	399,0	396,0	155,0	151,0

Величина упругих модулей определяется межатомными взаимодействиями и потому коррелирует с энергией связи *U*, необходимой для разделения твёрдого тела на отд. нейтральные атомы при *T* = 0К. Так, у W энергия связи на 1 атом равна *U* = 2,3 эВ, а *G* = 152 ГПа; у Cs энергия связи *U* = 0,2 эВ, *G* = 0,39 ГПа (у Cs — наименьший среди М. модуль сдвига). При увеличении темп-ры *T* модули упругости монотонно убывают, изменение модуля в интервале от 0 К до *T*_{пл} составляет ок. 50% исходного значения. В области упругого поведения в М. возможно проявление *внутреннего трения*. М. с низким уровнем внутр. трения, слабо рассеивающие энергию колебаний, используются при изготовлении акустич. резонаторов музыкальных инструментов.

Пластич. деформация М. осуществляется относит. сдвигом (скольжением) параллельных атомных плоскостей и двойникованием (см. *Пластичность*). Предел текучести в монокристаллах анизотропен и зависит от плоскости и направления, вдоль к-рых происходит скольжение. Совокупность плоскости и направления скольжения образует систему скольжения. В каждом кристалле существует система скольжения, в к-рой критич. величина внеш. напряжения для начала скольжения минимальна (напряжение лёгкого скольжения *t*, табл. 10).

Т а б л. 10. — Напряжение лёгкого скольжения при 300 К

Металл	Чистота, %	Плоскости скольжения	Направление скольжения	$t \cdot 10^{-7}$ Н/м ²
Ag	99,999	{111}	[110]	0,038
Al	99,994	{111}	[110]	0,08
Cu	99,98	{111}	[110]	0,05
Fe	99,96	{110} {112}	[111]	2,80
Mo	зонная плавка	{110} {112}	[111]	7,30
Zn	99,999	{0001}	[1120]	0,018
Ti	99,990	{1010}	[1120]	1,40

В случае механич. *двойникования* происходит сдвиг области кристалла в положение, зеркальное относительно области, не испытавшей сдвиг. Механич. напряжение, необходимое для возникновения двойника, больше, чем для обычного скольжения. Время образования двойника составляет неск. мкс.

Теоретическое сопротивление М. пластич. деформации и разрушению составляет $10^{-1}G$. Экспериментально

пластич. деформации и разрушение наблюдаются при напряжениях $10^{-4}—10^{-2}$. Это различие обусловлено существованием *дислокаций*. Движение дислокаций вдоль определ. плоскостей в кристалле обеспечивает сдвиг одной части кристалла относительно другой. Сопротивление решётки движению дислокаций (сила Пайерлса — Набарро) составляет $10^{-3}—10^{-2}G$. Сила Пайерлса — Набарро в М. с чисто металлич. связью мала, т. к. эта связь не является направленной и слабо меняется при изменении атомной конфигурации вблизи дислокации. В М. с компонентой *ковалентной связи*, имеющих объёмноцентриров. решётку, сопротивление скольжению несколько больше, однако всё же мало по сравнению с чисто *ковалентными кристаллами* (отсюда высокая пластичность).

Прочность и пластичность М. обусловлены также взаимодействием дислокаций между собой и с др. дефектами, примесями и их скоплениями, границами раздела фаз, включениями др. фаз. Величина этих взаимодействий пропорциональна *G*. В процессе развития пластич. деформации происходит «размножение» дислокации, к-рое приводит к затруднению их движения, т. е. к увеличению сопротивления металла пластич. деформации (деформационное упрочнение, или наклёп). Сопротивление М. пластич. деформации возрастает с увеличением степени деформации как $G\sqrt{\eta}$, где η — плотность дислокаций. В отожжённых (недеформированных) металлах кристаллах плотность дислокаций $\sim 10^7—10^8$ см⁻², сильная пластич. деформация приводит к её увеличению до $10^{11}—10^{12}$ см⁻².

При $T > 0,5 T_{пл}$ в пластич. деформации начинают играть существен. роль точечные дефекты, в первую очередь вакансии, к-рые, оседая на дислокациях, приводят к их выходу из плоскостей скольжения. Если этот процесс достаточно интенсивен, то деформация не сопровождается упрочнением: М. «течёт» с пост. скоростью при неизменной нагрузке (ползучесть). Релаксация напряжений и разрядка дислокац. структуры обеспечивают высокую пластичность М. при их горячей обработке. Отжиг сильно деформиров. металлич. монокристаллов нередко приводит к образованию поликристаллов с малой плотностью дислокаций внутри зёрен.

При увеличении плотности дислокаций образуются их скопления, являющиеся концентраторами внутр. напряжений. Вследствие этого в области скопления дислокаций могут образоваться микротрещины, рост к-рых приводит к разрушению. В отличие от др. твёрдых тел в М. достаточные для образования трещин внутр. напряжения развиваются при больших степенях пластич. деформации. В М. до разрушения в большинстве случаев происходит заметное развитие пластич. деформации, приводящее к ослаблению концентрации напряжений и торможению роста трещины (вязкое разрушение). Если движение дислокаций вблизи вершины трещины затруднено, концентрация напряжений ослабляется незначительно, происходит хрупкое разрушение.

Механич. характеристики М. можно изменять в широких пределах термич. и механич. обработкой, а также введением примесей (легированием). Улучшение механич. свойств М. основано на изменении условий движения, размножения и торможения дислокаций. В качестве материалов для изготовления конструкций чистые М. непригодны из-за их малой прочности. Напр., предел прочности Fe (техн. чистоты) $\sim 0,30—0,35$ ГПа, тогда как высокопрочные легиров. стали (сплавы Fe с С и др. М.) имеют предел прочности от 1,5 до 4,5 ГПа (см. *Механические свойства материалов*).

Лит.: Бернштейн М. Л., Займовский В. А., Механические свойства металлов, 2 изд., М., 1979; Физическое металловедение, под ред. Р. Кана, П. Хаазена, пер. с англ., 3 изд., т. 3, М., 1987. В. С. Крапошин.
МЕТАМАГНЕТИК — антиферромагнетик, в к-ром при низком магн. поле *H*; вдоль оси антиферромагнетизма отсутствует явление опрокидывания магн. подрешётки (т. н. спин-флоп переход, см. *Ориентацион-*