

## Раздел 4 Пластическая деформация

### Тема 4 Механизмы пластической деформации (2 часа)

#### План лекции

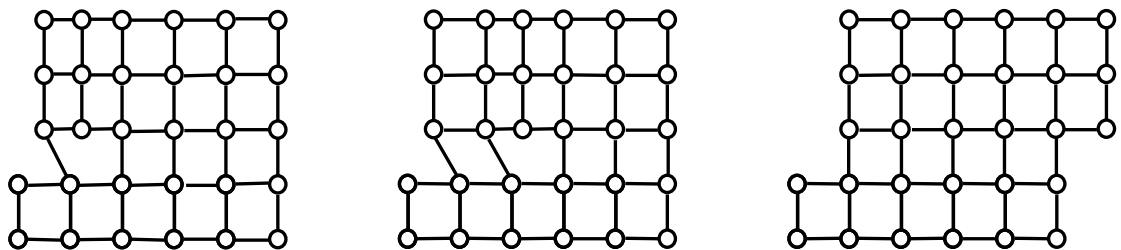
1. Пластическая деформация.
2. Механизмы пластической деформации.
3. Деформация скольжением.
4. Деформация двойникованием
5. Схема макроудлинения.
6. Влияние некоторых факторов на пластическую деформацию скольжением.

#### Механизмы пластической деформации.

##### Роль дислокаций в механизме пластической деформации

Пластическая деформация является результатом необратимых коллективных смещений атомов. В кристаллах эти смещения происходят путем движения дислокаций, что является атомным механизмом пластической деформации. Движение дислокаций может вызывать макропластическую деформацию образца путем либо *скольжения*, либо *двойникования*. Конечным итогом такого движения является сдвиг отдельных частей кристалла относительно друг друга или сдвиг и поворот атомных рядов в отдельных участках образца под некоторым углом к направлению сдвига.

В большинстве случаев металлы и сплавы *деформируются путем скольжения*. В элементарном виде механизм сдвига одной части кристалла относительно другой можно представить как результат пробега через него дислокации равной ширине кристалла (рисунок 8). Чем больше количество движущихся дислокаций и длиннее суммарный путь их перемещений, тем больше величина макропластической деформации.



а – краевая дислокация в кристалле; б – дислокация перемещена на одно межатомное расстояние в решетке; в – выход дислокации на поверхность и появление сдвига

Рисунок 8 – Схема сдвига верхней половины относительно нижней в результате пробега через него краевой дислокации

Величина относительного сдвига  $g$  равна:

$$g = \rho \cdot b \cdot l,$$

где  $\rho$  – плотность дислокаций;

$b$  – вектор Бюргерса;

$l$  – длина скольжения краевой дислокации.

*Вектор Бюргерса* – мера искажений решетки, обусловленных присутствием дислокаций.

В реальных металлах и сплавах, как правило, еще до начала деформации имеется много дислокаций разных типов. Под действием приложенных напряжений начинают работать различные их источники, порождающие новые дислокации. Движущиеся дислокации выходят на поверхность образца, взаимодействуют внутри него друг с другом: вступают в реакции, тормозятся, аннигилируют, образуют сплетения. Пластическая деформация определяется структурой, составом материала и условиями его деформации. Пластическую деформацию экспериментально изучают двумя методами: 1) микроскопическим анализом полированной поверхности образцов, на которой в результате деформации появляются особые “линии” и “полосы скольжения” и 2) методом дифракционной электронной микроскопии тонких фольг, вырезанных из деформированных образцов.

*Линии скольжения* – это ступеньки, образующиеся на поверхности в результате выхода дислокаций. Когда, например, краевая дислокация выйдет на грань кристалла, то на поверхности этой грани образуется ступенька, равная по высоте  $h$  вектору Бюргерса дислокации. При этом длина ступени, т. е. линии скольжения, будет равна длине вышедшей на поверхность краевой дислокации (рисунок 9). Вышедшая одним концом на поверхность винтовая дислокация при своем движении также образует ступеньку, длина которой будет соответствовать длине пробега дислокации. Когда после скольжения в одной плоскости на поверхность выходит несколько дислокаций и высота ступеньки  $h$  достигает  $\sim 10 \text{ \AA}$  и более, их можно наблюдать при электронном микроскопическом анализе реплик с предварительно отполированной поверхности деформированного образца. *Реплика* – тонкая, прозрачная для электронов пленка (например, угольная), наносимая на поверхность образца и очень точно копирующая ее рельеф. При просвечивании пучком электронов разные участки реплики, отличающиеся по толщине, дают разный контраст на изображении, благодаря чему можно наблюдать линии скольжения. После значительной деформации высота ступенек становится настолько большой, что их можно выявлять и под световым микроскопом.

Анализируя расположение линий скольжения, расстояние между ними, их высоту, можно составить не только качественное, но и количественное представление о величине пластической деформации. Зная кристаллографическую ориентировку анализируемой поверхности образца, по направлению линий скольжения определяют плоскости и направления скольжения. Перед деформацией с поверхности образца должна быть удалена окисная пленка, способная исказить картину распределения линий скольжения.

Метод дифракционной электронной микроскопии позволяет непосредственно наблюдать отдельные дислокации, определять их вектор Бюргерса и кристаллографию скольжения, оценивать характеристики дислокационной структуры на разных стадиях деформации.

Метод линий скольжения проще, особенно при использовании

светового микроскопа. С его помощью изучают только структуру поверхности. С помощью этого метода было определено, что скольжение и сдвиги в кристаллах при низкотемпературной деформации идут вдоль определенных для каждого типа решетки кристаллографических плоскостей и направлений. Направление скольжения всегда лежит в своей плоскости скольжения. Их совокупность есть система скольжения. В металлах может действовать одна или несколько одновременно систем скольжения, однако все эти системы относятся обычно к одной – двум кристаллографическим ориентациям, характерным для каждого металла и определяемым типом его решетки.

*Деформация двойникованием* идет в тех случаях, когда скольжение по тем или иным причинам затруднено. Наиболее часто двойникование наблюдается при низких температурах и высоких скоростях деформации, особенно в металлах с г.ц.к.- и о.ц.к.-решетками. В чистых г.ц.к.-металлах деформация двойникованием происходит только при отрицательных температурах и высоких скоростях деформации.

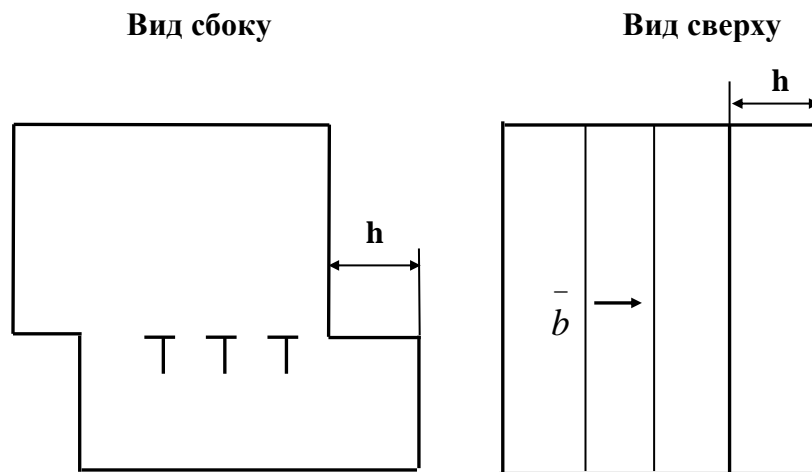
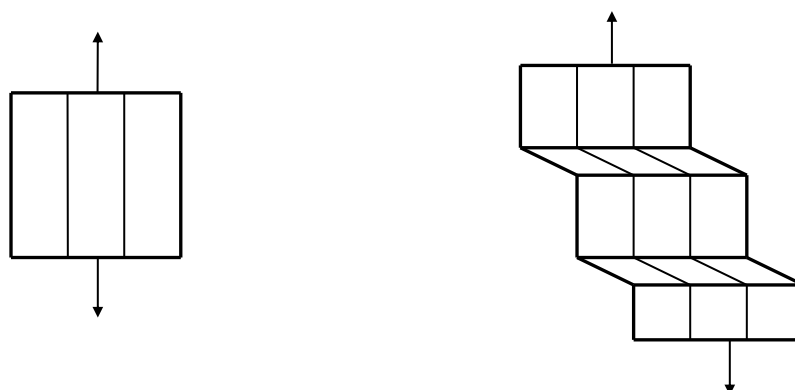


Рисунок 9 – Образование ступенек при выходе на поверхность краевых дислокаций

Схема макроудлинения образца при растяжении показана на рисунке 10. Видно, что при двойниковании происходит сдвиг одной части кристалла относительно другой вдоль определенной плоскости и направления двойникования. Плоскость двойникования – это обычно кристаллографическая плоскость с малыми индексами, которая является плоскостью симметрии двойникового образования относительно исходного кристалла.



## Рисунок 10 – Схема пластической деформации двойникованием

При металлографическом исследовании в световом и электронном микроскопах каждый двойник деформации выявляется в виде двух параллельных полос (следов его пересечения с поверхностью излома, шлифа или фольги). Специфичным для двойников деформации является очень малая ширина полос, (особенно в о.ц.к. металлах – меньше 5 мкм) и характерные сужения на концах. В поликристалле двойники никогда не переходят из одного кристалла в другой. Обычно они заканчиваются внутри зерна, а если доходят до границы, то возникающие в месте этого стыка напряжения могут способствовать появлению двойника в соседнем зерне, где он будет иметь иную ориентацию. Граница двойника обладает относительно низкой энергией и высокой устойчивостью, сохраняясь даже после высокотемпературного отжига.

Вероятность образования двойников в том или ином металле с одним типом решетки тем больше, чем меньше энергия дефекта упаковки.

Напряжения, необходимые для роста двойников, чаще всего значительно выше требуемых для скольжения. Поэтому деформация только двойникованием наблюдается редко. Обычно она начинается путем скольжения, а затем, по достижению определенного уровня напряжений, если дальнейшее скольжение затруднено. Иногда наоборот, если кристалл неблагоприятно ориентирован для базисного скольжения, его деформация начинается с двойникования. При этом ориентировка плоскостей скольжения может измениться таким образом, что в дальнейшем будет идти деформация скольжением.

Двойникование обычно не приводит к значительной остаточной деформации. Поэтому металлы, деформирующиеся только путем двойникования, малопластичны (например, висмут, сурьма).

Рассмотрим влияние некоторых факторов на картину пластической деформации скольжением. Увеличение энергии дефекта упаковки затрудняет расщепление дислокаций, уменьшает ширину полосы дефекта упаковки между частичными дислокациями. Это облегчает поперечное скольжение винтовых дислокаций. Чем больше энергия дефекта упаковки, тем раньше начнется интенсивное поперечное скольжение, дислокации легче обходят различные барьеры.

В результате пластическое течение осуществляется в основном в условиях интенсивно развитого поперечного скольжения. Высокую энергию дефекта упаковки имеет Al (г.ц.к.-решетка) и многие металлы с о.ц.к.-решеткой. Низкую – с г.ц.к.-решеткой (Cu, Ag, Au) (таблица 3).

Таблица 3 – Величина энергии упаковки  $\gamma$  чистых металлов

Тип кристаллической решетки	Металл	$\gamma$ , эрг/см <sup>2</sup> 1 эрг/см <sup>2</sup> = =1 МДж/м <sup>2</sup>	Тип кристаллической решетки	Металл	$\gamma$ , эрг/см <sup>2</sup> 1 эрг/см <sup>2</sup> = =1 МДж/м <sup>2</sup>
Г. ц. к.	Ag	10...40	Г. п. у.	Zn	30...150
	Au	20...60		Mg	170...250
Г. ц. к.	Pb	20...50	О. ц. к.	Re	180
	Cu	30...150		V	100
	Pt	95...120		Ta	110
	Ni	150...450		$\alpha$ -Fe	140
	Al	250		Cr	>300
				Mo	>300
				W	>300

Помимо структуры металла (тип металла, ширина полосы дефекта, моно- или поликристалл) на картине пластической деформации сильно сказываются условия, в которых проводится деформация.

#### Рекомендуемая литература

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1998. – 306 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
3. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 296 с.
4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. – 408 с.
5. Шарая О.А., Куликов В.Ю., Шарый В.И. Учебное пособие по курсу Механические свойства материалов», КарГТУ, 2004.

#### Контрольные задания для СРС (тема 1) [1], [2], [9]

1. Низкотемпературная пластическая деформация металлов скольжением.
2. Метод линий скольжения.
3. Метод дифракционной электронной микроскопии.
4. Стадии скольжения в монокристалле.
5. Влияние энергии дефекта упаковки на пластическую деформацию металлов скольжением.
6. Влияние схемы напряженного состояния на пластическую деформацию металлов скольжением.
7. Влияние температуры испытания на пластическую деформацию металлов скольжением.
8. Влияние скорости деформации на пластическую деформацию металлов скольжением.
9. Пластическая деформация металлов двойникованием.

## 10. Пластическая деформация твердых растворов и двухфазных сплавов.