

ДЕФОРМАЦИЯ, РАЗРЫВ и УПРОЧНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ¹⁾

М. Полани, Бермин-Далем.

Твердое тело, будучи подвергнуто механическому воздействию, изменяет свой вид. Если при этом оно вновь принимает первоначальную форму после того, как сила перестает действовать, то тело это было изменено упруго, если же, наоборот, то или иное изменение формы сохраняется, то имела место перегрузка. Такая перегрузка может или разорвать тело, или же только его деформировать; лишь в тех случаях, когда тело весьма хрупко, оно рвется без предварительного изменения его формы.

Деформация и разрыв до сих пор исследовались на очень разнообразном материале. Так, Гриффитс (Griffith) с успехом изучал разрыв на аморфных телах — стекле и кварце; широкий опыт техники по обработке и прочности материалов относится к кристаллическим веществам, каковы камень и металлы, которые послужили также моделью для математической теории пластичности (Прандтль, Генки, Надаи). Напротив того, физический анализ явлений деформации и упрочнения был в первую очередь осуществлен на отдельных кристаллах, именно кристаллах каменной соли и в особенности на крупных металлических кристаллах.

Мой сегодняшний доклад будет касаться, главным образом, исследований с металлическими кристаллами, при этом, конечно, по отдельным поводам будут использованы и данные, имеющиеся в распоряжении техники.

¹⁾ Доклад, читанный на конференции Faraday Society, посвященной природе сил сцепления. Опубликован в Trans. Faraday Soc., Vol. 24, Part 2, Febr. 1928 и Naturwiss. от 27/IV 1928 г. Перевел С. Т. Конобеевский.

1. Однокристалльные проволоки и палочки.

С тех пор, как Лауэ была открыта диффракция рентгеновских лучей в пространственной решетке кристалла, само понятие кристалла в физике испытало значительное изменение. Теперь, говоря о кристалле, мы более не думаем о закономерной внешней форме, о кристаллических гранях и ребрах, считавшихся прежде главнейшими отличительными признаками кристалла. Более существенным содержанием понятия кристалла сделалась его внутренняя структура, то закономерное расположение его молекул, которое называют пространственной решеткой и которое стало для нас видимым благодаря явлению диффракции.

Если выточить из кубика каменной соли шар или столбик, то его кристаллические грани более не существуют; однако, так как шар или столбик имеют решетку ту же, что и куб каменной соли, от которого они произошли, то эти тела мы также считаем кристаллами каменной соли, называя их „однокристалльными телами“. Благодаря пространственной решетке, лежащей в основе их строения, однокристалльные тела заключают в скрытом виде кристаллические грани — плоскости наиболее плотного расположения атомов, — проявляющиеся в качестве плоскостей спайности и скольжения, когда однокристалльное тело разрывается или деформируется. То же относится и к кристаллическим ребрам, которые существуют в решетке как направления наиболее плотного расположения атомов и обнаруживаются при разломе тела в виде границ между плоскостями спайности, в случае же деформации — в виде направлений сдвига плоскостей скольжения.

Существуют не только такие однокристалльные тела, которые потеряли свой первоначальный кристаллический облик лишь вследствие внешней обработки, но и такие, которые при самом своем возникновении имеют форму, не стоящую ни в какой связи с их кристаллической природой.

Таковы однокристалльные металлы. Эти проволочки и палочки состоят из металла, по своей структуре представляющего в каждом случае один цельный кристалл, но внешняя

форма их ничем этого не обнаруживает. Но и здесь скрытые кристаллические грани и ребра тотчас же проявятся, как только тело будет подвергнуто перегрузке. Однокристалльные проволоочки цинка, тщательно изученные мною, совместно



Рис. 1.



Рис. 2.

Рис. 1, 2. Скрытые кристаллические грани, появляющиеся при разрыве однокристалльной проволоочки.

На рис. 1 выступает плоскость базиса (0001) кристалла цинка, отличающаяся своим блеском и тонкой тройной штриховкой ст грани призмы (1010) на рис. 2, матовой и имеющей лишь только грубую штриховатость.

с Марком (H. Mark) и Шмидом (E. Schmid), разрываются при температуре жидкого воздуха по плоскостям, которые чаще всего оказываются плоскостями основания (0001) гексагональной решетки цинка. В качестве простого разрыва встречается также и плоскость призмы I-го рода (1010). Иногда

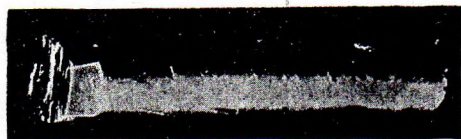


Рис. 3 показывает скрытое кристаллическое ребро, обнаруживающееся при разрыве в виде линии пересечения двух плоскостей разрыва.

при разрыве образуются обе эти плоскости, и тогда там, где они пересекаются, появляется ребро, соответствующее кристаллическому ребру $[10\bar{1}0]$ (дигональная ось 2-го рода), ранее существовавшее в скрытом виде.

Следует заметить здесь, что плоскость разрыва в различных проволочках одного и того же металла различно наклонена к оси проволоки, т. е. атомные плоскости (а следовательно, и вся кристаллическая решетка) имеют в каждом случае особую ориентировку по отношению к оси. Так как в силу этого на пространственную решетку производится воздействие в разных направлениях, то это объясняет, почему в различных проволоках роль плоскостей

разрыва играют разные грани. В общем предпочтительнее образуется та плоскость, которая ближе лежит к плоскости поперечного сечения.

Деформация однокристалльных цинковых проволок, особенно легко возникающая при их растяжении при обычной или повышенной температуре, также ведет к появлению скрытых кристаллических граней, проявляющихся здесь в

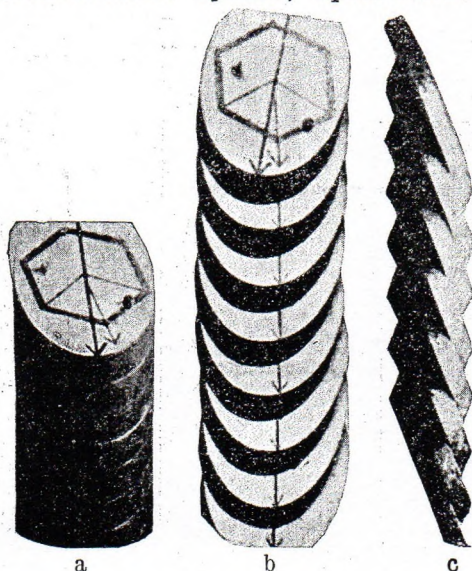


Рис. 4. Модель растяжения кристалла цинка: *a* кристаллическая цинковая проволока, срезанная по плоскости базиса. Длинная стрелка — большая ось эллиптического слоя скольжения, в направлении ее при растяжении создается наибольшее сдвигающее напряжение. Короткая стрелка — ребро $[10\bar{1}0]$ кристалла, служащее направлением скольжения. *b* и *c* вид спереди и сбоку модели в растянутом состоянии. Следует обратить внимание на форму ленты и на линии скольжения. Вершины эллипсов отступают от средней линии ленты. Также видно расширение ленты по сравнению с первоначальной толщиной проволоки. Короткая стрелка на этом рисунке — направление скольжения слоев, оно параллельно оси $[10\bar{1}0]$.

качестве плоскостей скольжения, следы которых можно заметить на боковой поверхности растягиваемого кристалла в виде отдельных линий скольжения (рис. 5). При этом одна из осей пространственной решетки кристалла кристаллографически совпадает с направлением скольжения в растягиваемой проволочке. Явление скольжения мы теперь и рассмотрим несколько подробнее.

2. Скольжение в монокристаллах.

Результаты опытов с растяжением однокристалльных цинковых проволочек могут быть наглядно представлены с помощью деревянной модели, изображенной на рис. 4. Тело, первоначально цилиндрической формы, благодаря растяжению, превращается в ленту с эллиптическим сечением. Происходит это вследствие скольжения вдоль параллельных



Рис. 5, *a* и *b* показывают растянутую однокристалльную проволочку цинка: *a* перпендикулярно к широкой стороне ленты, *b* параллельно ей. Снизу до стрелки кристалл остается нерастянутым, и первоначальная приблизительно цилиндрическая форма не изменена. Начиная отсюда вверх ширина ленты несколько превосходит толщину исходной проволочки. На рис. 5, *c* показана еще одна растянутая цинковая проволочка с хорошо видными линиями скольжения, причем последние явственно отклоняются от средней линии ленты.

плоскостей, следы которых в виде линий скольжения, имеющих форму эллипсов, можно видеть на боковой поверхности растягиваемой ленты (рис. 5). Верхняя из плоскостей модели, изображающих плоскости скольжения, несет на себе правильный шестиугольник: это имеет целью показать, что плоскостью скольжения по большей части служит базис, та же грань, которая преимущественно и появляется так же, как плоскость разрыва.

Длинная стрелка, нанесенная на верхней плоскости по направлению большой оси эллипса, указывает направление, в котором растягивающее усилие создает наибольшее напряжение для сдвига. Однако, разглядывая модель более внимательно, можно видеть, что скольжение происходит не в этом направлении, а параллельно короткой стрелке.

Это обнаруживается, во-первых, в том, что вершины эллипсов, образуемых линиями скольжения, не лежат на средней линии растягиваемой ленты, и, во-вторых, в том, что ширина ленты оказывается больше, чем толщина исходной проволочки.

Основание тому, что направление скольжения отклоняется от направления действующей силы, заключается во внутреннем строении кристалла. На модели это находит свое отражение в том, что направление скольжения, указываемое маленькой стрелкой, проходит параллельно стороне шестиугольника: поэтому оно должно быть признано совпадающим с одним из скрытых кристаллических ребер, именно с той, уже упомянутой выше осью решетки, по которой базис пересекается с прямой 1-го рода и которая кристаллографически обозначается знаком $[10\bar{1}0]$.

Итак, скольжение характеризуется не только тем, что оно происходит в плоскости, всегда кристаллографически predetermined, хотя бы эта плоскость и отклонялась значительно от плоскости наибольшего напряжения (которая должна во всех случаях лежать под углом в 45° к оси), но также и тем, что в данной плоскости скольжение происходит лишь в направлении, также определенном кристаллографически, которое может отклоняться от направления наибольшегодвигающего усилия в этой плоскости. Конечно, направление действующей силы должно сказаться в том, что из трех кристаллографически равнозначных прямых $[10\bar{1}0]$ (соответствующих трем сторонам нашего шестиугольника, рис. 5) будет избрана в качестве направления скольжения та, которая образует наименьший угол с направлением силы. Эта закономерность также становится ясной из рассмотрения модели.

Описанный здесь механизм, с помощью которого происходит растяжение, приводит к изменению ориентировки про-

странственной решетки по отношению к оси однокристалльной проволоочки. Рассмотрение модели убеждает нас, что при этом плоскость скольжения, в данном случае базис, по мере растяжения образует все более и более острый угол с осью проволоочки. Если бы растягивание можно было описанным образом продолжать неограниченно, то плоскость базиса, в конце концов, совпала бы с осью. И действительно, при растяжении цинковых кристаллов достигается такое положение решетки, что базис образует с продольной осью угол всего лишь в $5-6^\circ$. При этом вследствие того, что и направление скольжения в плоскости базиса кристаллографически определено, одна кристаллографическая ось также стремится стать все в более и более параллельное положение по отношению к оси проволоки. Это как раз то направление $[10\bar{1}0]$, вдоль которого происходит скольжение.

Итак, при деформировании происходит особое закономерное поворачивание решетки, и в результате растяжения мы имеем кристалл, у которого ось $[10\bar{1}0]$ лежит почти параллельно направлению растягивающего усилия. Поэтому для группы цинковых кристаллов различной первоначальной ориентировки можно получить одинаковое расположение решетки (по отношению к оси), подвергая кристаллы растяжению. Случаем, когда это имеет место, т. е. когда много цинковых кристалликов одновременно растягиваются, является вытягивание обыкновенной микрокристаллической цинковой проволоки. При этом, действительно, решетка во всех кристаллах поворачивается одинаковым образом и именно в данном случае так, что направление $[10\bar{1}0]$ устанавливается приблизительно параллельно продольной оси.

Подобное упорядочение кристаллического строения, которое приводит к структуре, называемой по аналогии с строением естественных волокон древесины — волокнистой текстурой, почти всегда появляется при вытягивании металлических проволок, причем, конечно, в зависимости от различного типа решеток возникают и разные расположения (3). У кадмия, решетка которого похожа на решетку цинка, устанавливается, как и у цинка, в направлении оси направление $[10\bar{1}0]$. У металлов с центрированной кубической решеткой

(например, W, Mo, Fe) — малая диагональ $[110]$ куба. У металлов с центрированно-гранной решеткой (например, Cu, Ag, Al) возникают две кристаллические группы: в одной параллельно оси проволоки становится большая диагональ $[111]$ куба, в другой — ребро куба. Тетрагональное олово является исключением, так как в нем при растяжении волокнистая текстура вообще не возникает.

Согласие между характером волокнистой текстуры и результатом вращения решетки втянутых однокристалльных проволок, на которое мы уже указали в случае цинка, было установлено и для кадмия (Э. Шмид), а также и для одного из металлов с центрированной кубической решеткой, именно вольфрама (Гаучер, 4). Однако алюминий, имеющий центрированно-гранную кубическую решетку, представляет собою отклонение, пока еще не находящее себе объяснения, от этого правила. Ориентировка, устанавливающаяся при растяжении кристалла, лишь в одном исключительном случае (именно при горячей протяжке) оказывается одинаковой с той, которая наблюдается для волокнистой текстуры (19). По большей же части конечная ориентировка в однокристалльном алюминии такова, что по оси устанавливается направление $[211]$, что, впрочем, также понятно с точки зрения открытого Тейлором и Элам [Taylor и Elam (5)] механизма растяжения. Почему в данном случае кристаллики микрокристаллической проволоки иначе устанавливаются, чем отдельный крупный кристалл, — остается пока не совсем понятным.

Между прочим, касаясь упомянутой работы Тейлора и Элам, следует указать, что наши представления о растяжении однокристалльных проволок, благодаря выбору в качестве примера цинка, оказываются до известной степени упрощенными. То обстоятельство, что у цинка исключительной способностью к скольжению обладает плоскость, не повторяющаяся в решетке многократно (существует лишь одна плоскость базиса в гексагональном кристалле), приводит к тому, что скольжение здесь почти исключительно совершается вдоль этой единственной плоскости. Если же, напротив, перейти к кубическим кристаллам, то здесь выступает

на первый план конкуренция между многими однозначными плоскостями и направлениями скольжения (например, в случае алюминия имеется 4 октаэдрических группы и 6 малых диагоналей куба). Конечная ориентировка, к которой стремится решетка растягиваемой кристаллической проволоочки,



уже более не определяется тем, что плоскость и направление скольжения устанавливаются по направлению растяжения. Напротив, условия для этого ко-



Рис. 6. Растянутый кристалл олова в виде ленты, покрытой линиями скольжения, не замкнутыми и имеющими бахромчатые края.

нечного положения, благодаря одновременно происходящему вдоль различных однозначных плоскостей и направлений скольжению, таковы, что значительного вращения здесь не происходит. Конечное положение является некоторым стационарным состоянием, в котором вращения, вызываемые скольжениями вдоль отдельных различно ориентированных плоскостей скольжения, взаимно уравниваются.

Одновременное скольжение вдоль нескольких плоскостей сопровождается и с внешней стороны одним явлением, отличным от того, что наблюдается в случае цинка. Вместо замкнутых резких линий скольжения, появляющихся у одного металла, здесь конкуренция различных плоскостей приводит к появлению взаимно пересекающихся зазубренных, порой до неузнаваемости, следов скольжения.

На рис. 6 можно видеть линии скольжения олова, имеющие неровный, как бы обшитый бахромою край (6), возни-

Направления скольжения, плоскости скольжения и плоскости разрыва у различных металлов ⁴⁾.

Металл	Кристалл. система	Направление скольжения	Плоскость скольжения	Плоскость разрыва	Наиболее плотное направление в решетке	Наиболее плотная грань
Цинк (2)	Гексагональный		Главн. плоскость скольжения (0001)	(0001) $Z_{-180^\circ} = 0,18 \text{ кг/мм}^2$	(10 $\bar{1}0$)	Наиболее плотное [0001]
Кадмий		[10 $\bar{1}0$]	$S_{-180^\circ} = 0,12 \text{ кг/мм}^2$ Следующая плоскость вероятно (10 $\bar{1}0$)	За ней следует (10 $\bar{1}0$) $Z_{-180^\circ} = 1,8 \text{ кг/мм}^2$		Следующ. [10 $\bar{1}0$]
Олово (6)	Тетраг.	Главн. направл. [001] на втором месте [101] на третьем месте [111] [101]	(100) и (110) обе по-видимому равнозначны	—	Наиболее плотн. [001], на 2-м месте [100], на 3-м [111], на 4-м [101]	Наиболее плотн. [100]. Следующ. [110]
Алюминий (5)	Куб с центрированными гранями	[111]	(111)	—	[101]	111
Медь						
Серебро						
Золото						
Латунь (9)	Куб центрированных.	[111]	(см. заключ. 2)	—	[111]	[111]
Вольфрам (4)						
Железо (10)						
Висмут (12)	Ромбоэдр. почти кубич.	[101] и вероятно на втором месте [110]	(111) и вероятно на 2-м месте (1 $\bar{1}1$) $S_{20^\circ} = 0,22 \text{ кг/мм}^2$	(111) $Z_{20^\circ} = 0,32 \text{ кг/мм}^2$ и вероятно на 2-м месте (1 $\bar{1}1$)	Наиболее плотн. [101] на 2-м месте [110]	Наиболее плотн. [111], на 2-м месте [111]
Теллур (12)	Ромбоэдр.	вероятно [10 $\bar{1}0$]	вероятно (10 $\bar{1}0$)	10 $\bar{1}0$ $Z_{20^\circ} = 0,48 \text{ кг/мм}^2$	[10 $\bar{1}0$]	[0001]

⁴⁾ Числа, приведенные в графах: „плоскость скольжения“ и „плоскость разрыва“ для цинка, висмута и теллура (подбуквами S и Z), представляют значение сдвигающего или разрывающего усилия, определенные III методом с сотрудниками (см. 5).

кающие вследствие одновременного скольжения вдоль различных плоскостей по одному общему направлению (см. табл. I). Подобное одновременное участие нескольких плоскостей в скольжении, происходящем по одному направлению, могло послужить основанием к тому, что Тейлор и Элам нашли для железа определенное направление скольжения, но не могли открыть, какая плоскость является плоскостью скольжения (7).

3. Поверхности скольжения, направления скольжения, поверхности разрыва и строение решетки.

Если в данном кристалле в качестве путей для скольжения всегда наблюдаются лишь определенные плоскости и прямые, то причина этому, надо думать, лежит в том, что эти пути обладают настолько исключительной способностью к скольжению, что другие плоскости и прямые, имеющие эту способность в значительно меньшей степени, могут не приниматься в расчет. Лишь при такой ориентировке решетки, когда предпочтительные плоскости и прямые находятся в особо неблагоприятном положении по отношению к оси, могут быть приведены в действие пути скольжения второстепенного значения. В кубических кристаллах, в силу наличия различно расположенных равнозначных плоскостей и прямых, такая неблагоприятная ориентировка решетки не может иметь места, но в гексагональных и тетрагональных кристаллах она может встречаться. Поэтому в кристаллических телах правильной системы всегда участвуют в скольжении главная плоскость и главное направление скольжения, в других же кристаллах приводятся также в действие плоскости и направления 2-го ранга.

Это можно видеть из приводимой таблицы (стр. 747), которая заключает в себе еще следующие закономерности:

1. В сходных решетках (цинк-кадмий) и особенно в одинаковых решетках (например во всех центрированно-гранных или центрированных решетках) встречаются одни и те же плоскости и направления скольжения.

2. Наиболее выделяющиеся пути, по которым происходит скольжение, по большей части суть плоскости и прямые решетки с наиболее плотным расположением атомов.

К этому последнему пункту мы еще вернемся позднее в главе о прочности, рассматриваемой в связи с теорией решетки. В отношении же первого заметим, что по новейшим наблюдениям, сходное поведение одинаковых решеток не может быть распространено также и на конкурирующие между собой различные (равнозначные) плоскости скольжения. Так Элам (9) нашла, что скольжение в кристаллах латуни (центрированно-гранная кубическая решетка) несколько отличается от поведения кристаллов чистой меди. Также по Шлосду и Вассерману [Wassermann (35)] волокнистые текстуры металлов Ag, Cu, Al, имеющих одинаковую решетку, хотя качественно и совпадают, но в смысле распределения кристалликов по двум группам ориентировки (см. выше) оказываются различными. Отсюда можно заключить, что даже у металлов одинаковой структуры отношение их способностей скольжения (и соответственного упрочнения) для различных плоскостей и прямых не одно и то же (см. гл. VII).

Разрыв кристалла по большей части наступает вследствие постепенного отшнуровывания без образования поверхности разрыва. Случаи, когда в кристаллах наблюдается действительный отрыв (с образованием плоскости разрыва), приведены в таблице. Плоскости разрыва, подобно плоскостям скольжения, являются в решетке самыми плотными (или следующими за ними) и совпадают с плоскостями скольжения в случае цинка, висмута и теллура, что, однако, не имеет места для железа (вольфрама).

4. Прочность и теория пространственной решетки.

Можно было бы теперь думать, что тесная связь явлений скольжения и разрыва кристаллов со строением решетки, — связь, выражающаяся в той минимальной прочности по отношению к сдвигу и растяжению, которой отличаются плоскости с наиболее тесным расположением атомов, является

указанием на то, что прочность кристаллов можно теоретически рассматривать и вычислять с точки зрения строения решетки. К сожалению, однако, это ожидание не оправдывается.

Это видно уже из того, что при разрыве и скольжении силы, связывающие кристалл, вообще говоря, не уравниваются наложенными внешними силами. Если бы последнее имело место, то в момент, когда кристалл пластически уступает силе, атомы его должны бы находиться в состоянии безразличного равновесия. Растяжимость в направлении критического усилия должна сделаться бесконечной или, иначе говоря, модуль упругости (соотв. сдвига) — исчезнуть. Так как этого не происходит, напротив, вплоть до предела, когда наступает перегрузка, не наблюдается почти никакого отступления от закона Гука, то приходится рассматривать уступку металла механической силе как „преждевременную“. Она наступает при натяжении значительно низшем, нежели то, которое теоретически требуется для разрушения идеальной решетки кристалла.

Это не прямое заключение может быть для разрыва подтверждено вычислением теоретического значения прочности и сравнения его с действительно надежными величинами (13, 14). Теоретическая величина лежит около нескольких сотен кг/мм^2 , против $0,2\text{—}0,5 \text{ кг/мм}^2$, найденных для каменной соли и цинка. Экспериментальное значение, таким образом, составляет менее 1% теоретического.

Пытались объяснить противоречие, принимая некоторые моменты, облегчающие наступление „преждевременного разрушения кристалла“. Вначале существовала тенденция считать причиной небольшие повреждения кристалла (трещинки) (особенно после успешных опытов Гриффитса с аморфными телами), теперь же более склонны относить это явление за счет температурного движения. Интересная дискуссия по этому вопросу между А. Смекалем [A. Smekal, (16)] и Р. Беккером [R. Becker (17)], исходившими из двух различных точек зрения, еще не привела к окончательным результатам. Кстати сказать, законченная структурная теория разрыва и скольжения должна охватить еще и случай образования двойни-

ков, оставшийся здесь, по ходу изложения, не рассмотренным. Дело в том, что и это явление наступает в области закона Гука, следовательно, также оказывается „преждевременным“.

5. Прочность при различной ориентировке кристаллов.

Бессилие разрешить центральную проблему прочности заставляет нас ограничиться пока исследованием фактически наблюдаемых закономерностей в надежде, что это поможет в дальнейшем решению основной задачи. Плодотворный путь для этого — измерение сопротивления скольжению и разрыву металлических кристаллов при различной ориентировке решетки по отношению к оси однокристалльной проволоки. В ряде обширных исследований Шмид (11, 12, 15) установил на кристаллах цинка, висмута и теллура простой закон, что каждая плоскость скольжения начинает скользить при достижении определенного сдвигающего напряжения независимо от величины силы, действующей в то же время нормально к этой плоскости; наоборот, разрыв вызывается определенной величиной натяжения перпендикулярно поверхности разрыва, действующее же в плоскости разрыва натяжение никак не влияет. Шмид мог показать, что прежние измерения прочности, сделанные Фойгтом [Voigt (18)], на различно ориентированных столбиках каменной соли, также подчиняются этой закономерности.

Тот же закон был найден также Саксом [G. Sachs (19)] для скольжения алюминия.

6. Упрочнение по отношению к сдвигу и разрыву.

Ряд других закономерностей, правда скорее качественного характера, можно найти, исследуя на монокристаллах явление упрочнения при холодной обработке (Kaltreckung), имеющее столь важное значение в технике. Осложняющим обстоятельством служит здесь то, что вытягивание изменяет ориентировку кристаллов, так что прочность кристалла может увеличиваться и без настоящего изменения свойств, единственно лишь в силу того, что необходимая для достижения

нужного напряжения для данной плоскости скольжения или разрыва нагрузка вследствие поворота решетки повышается. Однако автору совместно с Шмидом (20, 21, 22) удалось исключить влияние этого обстоятельства и доказать, что сопротивление сдвигу плоскостей скольжения при растяжении кристаллов олова, а также цинка, возрастает в несколько раз (упрочнение в отношении сдвига).

С другой стороны, исследования, произведенные мной совместно с Мазингом (G. Masing), показали (23) также, что сопротивление разрыву для вальцованного цинка, помещенного в жидкий воздух, достигает величины в 200 раз большей, чем та, которая при тех же условиях наблюдается для однокристалльного цинка (упрочнение в отношении разрыва). Открытое Иоффе (24) весьма значительное повышение разрывной прочности каменной соли при разрыве кристалла под водой также сводится к эффекту упрочнения, обусловленному пока еще вполне загадочным повышением пластичности смоченной каменной соли.

Принимая во внимание предыдущий параграф, можно теперь из приведенных фактов сделать следующий вывод: растягивание вызывает в кристалле изменения, благодаря которым разрыв и скольжение наступают не столь „преждевременно“, иначе говоря, прочность кристалла приближается более к своему теоретическому значению.

7. ИЗГИБ КРИСТАЛЛА.

Каким же образом, спрашивается, может происходить изменение свойств кристалла вследствие его растяжения? Ясно, что это явление требует некоторого расширения наших представлений о строении решетки, так как решетка деформированного кристалла должна представлять собою нечто отличное от решетки недеформированного.

Я полагаю, что к правильному представлению в этом вопросе можно прийти, рассматривая изгибание кристалла. Допустим, что сгибаем однокристалльную палочку посередине. Каким образом совершается это изменение формы? Каково будет состояние решетки в деформированном участке?

Механизм деформации, согласно М ю г г е [Mügge (26)], можно свести к так называемому скольжению с изгибом (Biegegleitung)—явлению, наблюдавшемуся, например, этим автором при изгибе гипсовых пластинок. Скользящие один по другому слои кристалла сдвигаются при этом способе скольжения не параллельно друг другу, но закручиваются по поверхности цилиндра, ось которого перпендикулярна к направлению скольжения (рис. 7).

Что касается состояния кристалла в месте изгиба, то прежде всего следует считать невозможным, чтобы решетка здесь осталась неискривленной. Хотя нам и неизвестны особенности этого модифицированного состояния решетки, однако следующее во всяком случае является несомненным:



Рис. 7. Изгиб слоев скольжения у олова. Можно видеть место перехода проволочки в ленту, сама же лента оторвана.

1. В изогнутых вследствие скольжения слоях имеются упругие напряжения. Именно — на выпуклой стороне натяжение, на вогнутой — сжатие.

2. Между двумя соседними слоями решетка прерывается, так как здесь растянутый слой граничит со сжатым.

Описанное состояние решетки схематически представлено на рис. 8, изображающем два изогнутых слоя скольжения. Легко видеть, что возникающие вследствие скольжения поверхности раздела отличаются принципиально от обычных межгранулярных границ, так как здесь граничат кристаллографически одинаковые поверхности. В силу этой их особенности будем называть такие границы „внутренними поверхностями раздела“. Следует заметить, что показанные на рисунке упругие искривления сильно преувеличены; в действительности они не превышают 0,5%.

Спросим себя теперь, может ли данная здесь картина изогнутого кристалла сделать более понятной причину его

упрочнения? Мне думается, что на этот вопрос можно ответить утвердительно.

Изогнутый кристалл должен упрочняться потому, что его пространственная решетка вдоль внутренних поверхностей раздела оказывается расстроенной и, следовательно, пути скольжения (направления и поверхности скольжения), которые должны были бы существовать на месте этих поверхностей раздела, блокируются. Также следует, что после того, как скольжение происходило в одной системе параллельных плоскостей, всякое скольжение в новом направлении, пересекающем первое, должно быть затруднено, что должно еще повышать сопротивление изменению формы.

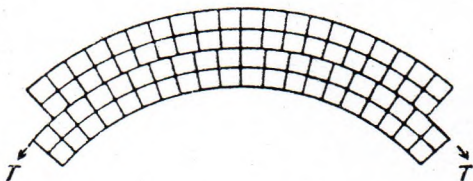


Рис. 8. Схематическое изображение двух соседних слоев скольжения, изогнутых упруго. Решетка изображается сеткой, и можно видеть, что выпуклая сторона слоя растянута, тогда как вогнутая сжата. Вдоль поверхности касания TT прямые линии и плоскости решетки искажены. Они представляют собою „внутреннюю поверхность раздела“ кристалла.

Конечно, можно было бы возразить, что эта картина явления упрочнения недостаточна, так как в действительности упрочнение происходит не только при таких скольжениях, когда образующиеся поверхности перестают быть параллельными первоначальному, но уже в самом начале, когда плоскости скольжения только приводятся в действие.

Такому возражению можно, с другой стороны, противопоставить факт несомненного существования предпочтительного упрочнения скрытых плоскостей скольжения. Это явление, впервые установленное на цинке, где оно выражено наиболее резко, наблюдается, кроме того, в слабой степени в алюминии, а также, согласно новым исследованиям, высту-

пает явственно у латуни ¹⁾ (28). Но если тем самым можно считать установленным факт предпочтительного упрочнения путей скольжения, появляющихся лишь позднее, — факт, вытекающий прямо из представлений о решетке изогнутого кристалла, то к этому еще следует прибавить, что нельзя говорить об упрочнении каждого из этих путей в отдельности. Это значит, что мы должны принять, что скольжение не совершается только в единственной системе параллельных путей, но уже с самого начала возникают и другие пересекающие под углом пути главного скольжения незначительные сдвиги, которые хотя и являются малозначащими для измеряемого грубо, общего изменения формы тела, однако ведут к повышению сопротивления в путях главного скольжения. Действительно, чрезвычайно мало вероятно, чтобы скольжение когда-либо могло быть ограничено одной системой параллельных плоскостей. Для кристаллов алюминия Саксу и Карнопу (19) удалось показать с помощью точных измерений деформируемого образца, что уже при самом начале растяжения действуют совместно несколько плоскостей. Даже у цинка, где предпочтение одной из плоскостей (базиса) в роли плоскости скольжения кажется наиболее определившимся, можно найти при разрыве кристалла на его поверхности разрыва штрихи, являющиеся следами многочисленных, взаимно пересекающихся скольжений (2).

Можно было бы еще возразить, что в случае изгиба кристалла дело идет о некотором специальном случае пластической деформации, к которому нельзя приравнивать те случаи растяжений, когда происходят лишь одни параллельные сдвиги соскальзывающих слоев. Однако эти возражения неосновательны, так как даже при таком растяжении, которое, по видимости, происходит вполне равномерно,

¹⁾ Наблюдения, на основании которых Шмид (29) пришел к заключению, что скрытые плоскости скольжения у цинка менее упрочнены, нежели плоскости, уже приведенные в действие, согласно новым наблюдениям Матьюсона (30) и самого Шмида, следует толковать в другом смысле.

Лауэ-диаграммы показывают наличие известной кривизны в плоскостях скольжения (31).

Впрочем, данное здесь истолкование относится лишь к одному из видов упрочнения, именно к тому, при котором увеличивается сопротивление сдвигу. Упрочнение разрывное остается необъясненным. Можно лишь указать на родство его с другим, также загадочным явлением: именно с тем, что мелкозернистый металл имеет значительно большую прочность на разрыв, нежели металл крупнокристаллический или, еще в большей степени, нежели однокристалльная проволока (23). Так как при деформировании кристалл благодаря возникновению внутренних поверхностей делится на части, то понятно, почему он при этом начинает вести себя подобно мелкозернистому металлу.

8. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРЕЖНИХ УПРУГИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА ¹⁾).

Деформированные кристаллы заключают в себе напряжения и в них имеются внутренние поверхности раздела. В этом состоянии они, следовательно, более богаты энергией, чем исходный кристалл, причем увеличение энергии двоякое — с одной стороны, вследствие наличия напряжений, с другой стороны, благодаря энергии новых внутренних поверхностей раздела. Подобное состояние есть состояние вынужденное и должно стремиться перейти в нормальное состояние, потому и следует ожидать, что при случае оно будет самостоятельно в него возвращаться. У многокристалльных металлов хорошо известно подобное превращение упрочненного материала в состояние неупрочненное, происходящее с течением времени и особенно при действии повышенной температуры (отжиг); следует допустить, что это явление стоит в связи с высказанным положением о способности деформированного кристалла к обратному превращению.

¹⁾ Содержание этой главы основывается на работах, сделанных автором совместно со Шмидом. См. (34).

Первый шаг, необходимый для этой связи, уже сделан, именно, получено доказательство существования размягчения (явления, обратного упрочнению) в однокристалльных телах. При этом найдены два различных способа, которыми может происходить размягчение растянутых кристаллов цинка: 1) постепенное размягчение тем более полное, чем выше температура и дольше время отжига, и 2) второй вид размягчения, при котором возвращается первоначальная прочность кристалла, но без промежуточных стадий (по крайней мере заметных). В первом случае какого-нибудь изменения в строении монокристалла не заметно. Этот вид размягчения называют отпуском (*Erholung, Vergütung*). Во втором случае проволока после отжига оказывается состоящей из двух или большего числа кристаллов — здесь, следовательно, наступает распадение зерен, рекристаллизация (*Rekrystallisation*). Так как и отпуск и рекристаллизация наблюдаются также у многокристалльных тел (хотя первое явление, вследствие сложности многокристалльных тел, лишь предполагается, но не могло быть точно установлено), то в качественном отношении искомая связь между одно- и многокристаллическими телами устанавливается.

Если мы теперь примем, как это сделано в предыдущем параграфе, что упрочнение вызывается появлением внутренних поверхностей раздела, то размягчение, наоборот, должно иметь в основе ликвидацию этих поверхностей раздела, вследствие чего подразделение кристалла на части или исчезает, или, по крайней мере, уменьшается, так что участки неповрежденной решетки делаются больше. Подобное восстановление решетки ведет не к появлению новых кристаллических зерен, а единственно лишь к исправлению уже имеющихся. Притом, чем больше эти исправления, тем сильнее и размягчение кристалла.

Силой, вызывающей это восстановление решетки, следует считать стремление атомов, лежащих по границе раздела, к возвращению в нормальное положение. Так как движения, вызываемые этими силами, могут совершаться лишь в пределах атомных расстояний, то они не в состоянии привести к заметному (на-глаз) выравниванию изогнутых слоев

скольжения. Поэтому состояние напряжения кристалла благодаря отпуску лишь незначительно ослабляется и продолжает служить движущей силой для рекристаллизации, наступающей при дальнейшем повышении температуры. Рекристаллизацию же следует понимать как дальнейшее выравнивание напряжений, которое происходит путем роста зерен.

Мне кажется, что следующие, довольно важные, наблюдения хорошо согласуются с этой гипотетической картиной.

1. При отпуске, как показывает рентгеновское исследование, искривление поверхностей скольжения сохраняется [Сакс (19)]. Наоборот, рекристаллизация (поскольку она не сопровождается появлением вторичных напряжений) приводит к образованию здорового зерна.

2. Когда монокристалл растягивается, то влияние растяжения на прочность и на способность к рекристаллизации оказывается различным, будет ли растяжение совершаться в виде простого вытягивания, как это мы иллюстрировали выше на модели, или же путем вальцевания, или проковки. При вытягивании получается много меньшая прочность и меньшая рекристаллизационная способность, чем при вальцовке и проковке (так, растянутый в 5 раз кристалл олова рекристаллизуется только вблизи точки плавления (210°), провальцованный же в такой же мере — уже при 60°). Различие вызывается тем, что скользящие слои при простом растягивании лишь незначительно изгибаются и в конечном результате остаются почти плоскими. При вальцовке же или при ковке, напротив, происходит значительное выжимание слоев вместе с соответствующим накоплением напряжений и обильным образованием внутренних поверхностей раздела.

3. Если отчасти растянутый кристалл нагревается, то рекристаллизация начинает распространяться от того места, где вытянутая лента кристалла граничит с нерастянутым участком его (рис. 9). Таким образом наибольшая рекристаллизационная способность оказывается не в области наибольшего растяжения, но в некоторой промежуточной области. Особенность этой переходной области в том, что здесь ориентировка решетки, как она дана в исходной проволочке, переходит в ориентировку кристаллической ленты, иначе

говоря, здесь имеется изгиб кристалла. Однако сильно изогнутые в этом месте слои при дальнейшем ходе растяжения, когда они в свою очередь переходят в кристаллическую точку, вновь делаются плоскими и уже нельзя более заметить в них на взгляд никакой кривизны (21).

Это означает, что в процессе растяжения, во время которого отдельные слои кристалла один за другим изгибаются и затем вновь выпрямляются, рекристаллизационная способность достигает максимума в местах, где происходит изгибание, и вновь падает, несмотря на увеличивающееся растяжение, когда слои скольжения опять выравниваются. Это стоит в согласии с нашим представлением о том, что рекристалли-



Рис. 9. Частично растянутый (слева нерастянутая, справа растянутая часть) кристалл олова, подвергнутый рекристаллизации. Новообразование зерен начинается на границе между растянутой и нерастянутой частью кристалла. На это место указывает стрелка. Увелич. в 10 раз.

зация вызывается упругими напряжениями, накапливающимися в местах изгибов (более грубых) слоев скольжения.

Механическое выравнивание изгибов слоев скольжения не должно никак влиять на внутренние поверхности раздела, если, как мы понимаем, эти последние могут исчезать лишь вследствие теплового движения. Поэтому упрочнение должно происходить при дальнейшем растяжении, хотя бы при этом и происходило выравнивание слоев. Этот вывод также находит подтверждение (из анализа кривых растяжения), именно: несмотря на убывающую рекристаллизационную способность, упрочнение при дальнейшем растяжении увеличивается.

Описанное здесь явление перегиба в ходе рекристаллизационной способности, в противоположность непрерывному росту упрочнения при выравнивании слоев скольжения, может служить объяснением следующего простого опыта Чокральского [J. Czochralsky (32)]: кристаллическая палочка из

алюминия закручивается. У кристалла возникает при этом рекристаллизационная способность и он в то же время упрочняется. При обратном раскручивании рекристаллизационная способность уменьшается, а упрочнение, наоборот, продолжает возрастать, как это было показано Саксом (37).

4. Наконец, следует еще указать на одно замечательное наблюдение, сделанное Шмидом (33), а именно, что при отпуске не только исчезает повышенное сопротивление изменению формы (до сих пор речь шла только о такого рода отпуске, изменяющем сопротивление сдвигу), но и происходит восстановление прежней разрывной прочности (Reisserschöpfung), именно исчезает без наступления рекристаллизации то повышение прочности на разрыв, которое получилось вследствие предварительной деформации. Явление это (в основе своей еще вполне загадочное) находится в согласии с нашим предположением о том, что упрочнение на разрыв обуславливается существованием внутренних поверхностей раздела.

Моно- и поликристалл.

Итак монокристаллы, совершенно подобно поликристаллическим телам, испытывают упрочнение и притом как по отношению к скольжению, так и по отношению к разрыву. Состояние упрочнения также и в случае монокристалла оказывается состоянием вынужденным, переходящим при нагревании в нормальное состояние, или посредством отпуска (Erholung), или же путем рекристаллизации. Так дело обстоит с качественной стороны. Но в количественном отношении существуют крупные различия. Сравним, например, кривые растяжения одно- и многокристалльного тела, изображенные на рис. 10. Ясно видно, насколько быстрее происходит упрочнение монокристалла при растяжении. Такая же разница замечается и в рекристаллизационной способности, вызываемой предварительным деформированием. При одинаковой степени деформирования монокристалл рекристаллизуется при значительно большем нагревании, нежели поликристаллическое тело. Если наши представления об упрочнении и рекристаллизации правильны, то различие должно заклю-

чатся в том, что в зернах подвергнувшегося растяжению поликристаллического тела внутренние поверхности раздела и напряжения, существующие в местах изгиба слоев скольжения, возникают в большем количестве, нежели при равных условиях в монокристалле. Что это действительно должно быть так, показывает один взгляд на кристаллическое

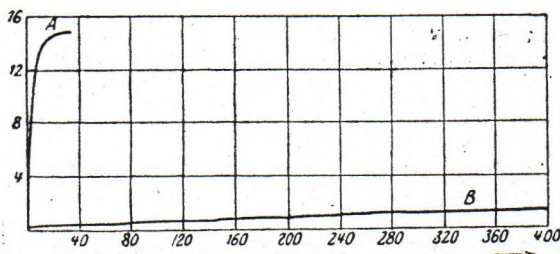


Рис. 10. Диаграмма растяжения *A* — отожженный монокристалльный металл. *B* — монокристалл.

зерно любого многокристалльного тела, со всех сторон стиснутое своими соседями: здесь, разумеется, исключается то закономерное изменение формы (образование ленты и пр.), при котором только и возможно образование растянутого кристалла, имеющего исключительно лишь плоские поверхности скольжения. Более того, именно взаимная эта связь



Рис. 11. Состоящий из нескольких крупных кристаллов столбик после растяжения. Образование узла на границе соприкосновения двух кристаллов (по Вентцелю), $\frac{2}{3}$ натуральной величины.

на общих границах между зернами необходимо вызывает вынужденные изменения формы в зернах, приводящие к хорошему перемешиванию многокристалльного тела.

Можно ожидать, что это принуждение, действующее главным образом в области межграницных границ, наиболее проявляет себя в их ближайшем соседстве. Действительно, границы между зернами суть места наибольшего упрочнения.

Это видно, например, из того, что при растяжении проволоки, состоящей из двух кристаллов, на месте соприкосновения их всегда образуется узел (рис. 11). Также и при рекристаллизации границы между зернами оказываются местом, откуда преимущественно начинается новообразование, как это уже давно было показано Чаппелем [Chappel (36)] и подтверждено также опытами с двукристалльной проволокой (34). Замечательно то, что, как указал Сакс (19), различие в поведении моно- и поликристалла в случае металлов с кубической решеткой незначительно. Вероятно это потому, что здесь всегда участвуют одновременно несколько плоскостей и направлений скольжения, пересекающихся между собой, которые поэтому быстрее приводят кристалл к упрочнению.

Состояние вопроса.

Геометрический механизм изменения формы кристаллов как он изложен здесь, примыкает к более ранним минералогическим исследованиям и как будто в основном может считаться выясненным. Неясным остается, напротив, вопрос о „преждевременном“ наступлении разрыва, скольжения и двойникового сдвига. Эти три вида изменения формы тесно связаны между собой и могут лишь вместе найти свое объяснение.

Что касается упрочнения, то можно, исходя из состояния решетки кристалла при изгибе, создать его ясную картину, которая будет заключать в себе лишь необходимые выводы. Мне кажется поэтому допустимым и желательным развить эти представления еще дальше — до тех границ, в которых они окажутся полезными.

Указанная картина в состоянии дать объяснение для некоторых существенных сторон явлений упрочнения, отпуска и рекристаллизации.

Конечно, можно упомянуть о многом, что или вовсе не может быть объяснено при помощи данной картины или объясняется ею с трудом. Таково, например, изменение электрических и магнитных постоянных при деформации, повышение окрашиваемости каменной соли парами натрия [При-

брам (Pribram) и Смекаль], влияние воды на упругие свойства каменной соли и т. п. Быть может то или иное явление указывает на дополнения или изменения, в которых наша теория еще нуждается.

ЛИТЕРАТУРА.

1. A. A. Griffith. Phil. Trans, 221, A, 163, 1921.
2. H. Mark, M. Polanyi u. E. Schmid. Z. f. Physik, 12, 58, 1922.
3. M. Ettisch, M. Polanyi u. K. Weissenberg. ZS. f. Phys. Chem., 12, 58, 1922.
4. F. S. Goucher. Phil. Mag. (6), 48, 229 u. 800, 1924.
5. G. J. Taylor u. C. F. Elam, Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, 102, 613, 1923.
6. H. Mark u. M. Polanyi. Z. f. Physik, 18, 75, 1923.
7. G. J. Taylor u. C. F. Elam. Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, 112, 289, 1926.
8. C. F. Elam. Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, 112, 280, 1926.
9. C. F. Elam. Proc. Roy. Soc. of London, Ser. A, 115, 148, 1927.
10. L. B. Pfeil u. C. A. Edwards. Journ. Iron Steel Inst. 109, 129, 1924.
11. M. Polanyi u. Schmid, также E. Schmid u. M. Georgieff. Z. f. Physik, 36, 759, 1926.
12. E. Schmid u. G. Wassermann. Dissert. Berlin, 1927.
13. M. Polanyi. Z. f. Physik, 7, 323, 1921.
14. B. Zwicky. Phys. ZS., 24, 131, 1923.
15. E. Schmid. Proc. Int. Congr. Appl. Mec. Delft, 342, 1924.
16. A. Smekal. Phys. ZS., 26, 707, 1925; ZS. f. techn. Phys., 7, 535, 1926.
17. R. Becker. ZS. f. techn. Phys., 7, 547, 1926.
18. A. Sella u. W. Foigt. Ann. d. Phys., 48, 636, 1893.
19. R. Karnop u. G. Sachs. Z. f. Physik, 42, 283, 1927.
20. M. Polanyi u. E. Schmid. Verhandl. d. dtsh. phys. Ges., 4, 1923.
21. M. Polanyi u. E. Schmid. Z. f. Physik, 32, 684, 1925.
22. E. Schmid. Z. f. Physik, 22, 328, 1924.
23. G. Masing u. M. Polanyi. Z. f. Physik, 28, 169, 1924.
24. A. Joffe, M. W. Kirpitschewa u. A. M. Lewitzky. Z. f. Physik, 22, 286, 1924.
25. W. Ewald u. M. Polanyi. Z. f. Physik, 28, 29, 1924; 31, 746, 1925.
26. O. Muegge. Neues Jahrb. Miner., 1898, I, S. 155.
27. M. Polanyi. ZS. f. Kristallogr., 61, 49, 1925.
28. Cp. (5) и (9).
29. E. Schmid. Z. f. Physik, 40, 54, 1926.

30. C. H. Mathewson. Am. Inst. Mining. Met. Inst. Januar 1927.
 31. J. Czochralsky. ZS. f. Metallkunde, 15, 60, 126, 1923.
 32. J. Czochralsky. Proc. Int. Congr. Appl. Mec. Delft., 1924; ZS. f. Metallkunde, 17, I, 1925.
 33. E. Schmid. Z. f. Physik, 32, 918, 1925.
 34. M. Polanyi u. E. Schmid. ZS. f. techn. Phys., 5, 580, 1924.
 35. E. Schmid u. G. Wassermann, Z. f. Physik, 42, 779, 1927.
 36. Chappel. Journ. Iron Steel Inst., 89, 460, I, 1914.
 37. G. Sachs. ZS. f. Metallkunde, 18, 209, 1926.
-