

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКПО ПОВОДУ ДИСЛОКАЦИОННОЙ ГИПОТЕЗЫ
ПЛАСТИЧНОСТИ*М. В. Классен-Неклюдова и Т. А. Конторова*

В февральском выпуске УФН за 1952 г. был опубликован перевод обзорной статьи американского физика Коттреля «Теория зацеплений в кристаллической решётке» *).

В статье Коттреля излагаются так называемые «дислокационные» представления о механизме пластической деформации кристаллических тел. Как известно, впервые эти представления были сформулированы Тейлором ещё в 1934 году¹. За прошедшие с тех пор два десятилетия дислокационная гипотеза пластичности кристаллов усиленно развивалась зарубежными учёными. Количество опубликованных работ, посвящённых этим вопросам, очень велико.

Существенно отметить, что в настоящее время сторонниками дислокационной теории являются все иностранные исследователи пластичности, как теоретики, так и экспериментаторы.

В иностранной литературе наблюдается, кроме того, тенденция объяснить с «дислокационной» точки зрения также и ряд свойств кристаллов, не имеющих непосредственного отношения к явлению пластичности. Так, например, в ряде работ рассматривается дислокационная модель границ зёрен в поликристаллах, обсуждается вопрос о «дислокационном» механизме роста кристаллов и т. п.

Перевод статьи Коттреля не снабжён редакционными примечаниями. У читателя может поэтому сложиться впечатление, что правильность дислокационной теории пластичности не вызывает сомнений, а также что этой теории придерживаются и все советские учёные.

В нашей статье «Развитие современных теоретических представлений о природе пластической деформации», опубликованной в УФН в 1944 г.², отмечалось, что «дислокационные» представления о механизме пластичности кристаллов встречают серьёзные принципиальные возражения.

*) УФН, XLVI, вып. 2, стр. 179—230 (1952).

Основываясь на более современном изложении дислокационной теории, даваемом Коттрелем, попытаемся выяснить — претерпели ли эти представления какие-либо существенные изменения, устранены ли основные недостатки теории и достигнуты ли какие-либо успехи на пути объяснения экспериментальных закономерностей, наблюдаемых при пластической деформации кристаллов.

На первой странице своего обзора Коттрель пишет:

«Уже стало очевидным, что особый вид дефекта кристаллической решётки, именуемый дислокацией, представляет собой важное звено, связывающее атомную структуру металлов с их кристаллографическими и пластическими свойствами...»

Что же такое «дислокация» (или «зацепление»), т. е. какие именно дефекты предполагаются ответственными за пластические свойства кристаллов?

На стр. 180 читаем:

«Все дислокации сводятся к немногим стандартным типам, имеющим вполне выраженные формы».

В качестве основного типа дислокаций Коттрель рассматривает далее линейную дислокацию, модель которой была предложена Тейлором в 1934 г.¹ Напомним, что по Тейлору отдельная дислокация представляет собой такое нарушение правильного расположения частиц решётки, при котором число атомов в одном из атомных рядов на единицу больше (сгущение) или меньше (разрежение) числа атомов в смежном атомном ряду; такое искажение типа «ноннуса» охватывает значительную область кристалла. Тейлор считает, что в кристаллах существуют правильные «решётки дислокаций», состоящие из чередующихся друг с другом рядов «положительных» и «отрицательных» дислокаций (сгущений и разрежений).

Ко второму основному типу дислокаций Коттрель относит так называемые «винтовые» дислокации, введённые в рассмотрение Бюргерсом в 1939 г.²

Основные положения дислокационной гипотезы пластичности сводятся к следующему:

1) Предполагается, что в реальных кристаллах дислокации упомянутого выше типа существуют до начала пластической деформации.

2) Предполагается, что пластическая деформация является результатом перемещения дислокаций вдоль плоскостей скольжения.

Говоря об основных свойствах дислокаций, Коттрель пишет: «Основными свойствами дислокаций являются их подвижность вдоль плоскости скольжения и, как результат этого движения, относительное смещение частей кристалла, расположенных по разные стороны плоскости скольжения, в направлении скольжения. Эти свойства объясняют важное значение дислокаций в теории пластичности и резко отличают дислокации от других видов дефектов решётки» (стр. 183).

Каковы причины появления дислокаций в кристаллической решётке? Напомним, что Тейлор предполагал в своё время, что как отдельные дислокации, так и «решётки дислокаций» возникают в кристаллах в результате тепловых флуктуаций. Мы указывали ², что искажения, возникающие в кристаллической решётке за счёт тепловых флуктуаций, не могут существовать в ней длительное время, они должны постепенно рассасываться под влиянием тех же причин, которыми вызвано их появление. Тем более неправдоподобной представляется гипотеза Тейлора о возможности образования в кристаллах правильной решётки дислокаций. За этот период времени ряд авторов убедился в том, что тепловые флуктуации действительно не могут быть причиной возникновения дислокаций. Расчёты показали, что энергия тепловых флуктуаций недостаточна для образования искажений типа тейлоровских дислокаций, простирающихся на значительную область кристаллической решётки. Тем более она недостаточна для образования более сложных «винтовых» дислокаций.

Обсуждая вопрос о возможных причинах появления дислокаций в кристаллах, Коттрель вынужден теперь признать:

«Большая энергия их образования приводит к убеждению, что дислокации не могут существовать, как устойчивые детали структуры кристалла в состоянии равновесия и едва ли могут быть образованы тепловыми флуктуациями, даже в сильно напряжённом, но в других отношениях совершенном кристалле» (стр. 227).

Следует отметить, что по вопросу о механизме образования дислокаций у сторонников дислокационной гипотезы пластичности вплоть до настоящего времени не существует единого мнения.

Зейтц ⁴ полагает, что дислокации возникают в перенапряжённой зоне у концов трещин, присутствующих в реальных кристаллах. Коттрель критикует эту точку зрения, отмечая, что достаточно большие концентрации напряжений, соответствующие энергии образования дислокаций, могли бы иметь место лишь при наличии трещин весьма большой глубины (порядка 1 мм).

К этому, как нам кажется, необходимо добавить следующее. Если бы трещины действительно могли служить источником образования «дислокаций», то растворение поверхностного слоя кристалла, приводящее к устранению поверхностных трещин, должно было бы повлечь за собой не только повышение прочности на разрыв (наблюдаемый на опыте общезвестный «эффект Иоффе»), но также и заметное возрастание предела упругости и предела текучести. В частности, кривая растяжения кристаллов каменной соли в воде должна была бы при этом лежать выше кривой растяжения, снятой на воздухе.

Специальные экспериментальные исследования ⁵, однако, показали, что растворение поверхности кристаллов NaCl не сопровождается повышением их предела упругости и предела текучести.

Весьма распространённой является также другая точка зрения, согласно которой источником дислокаций могут служить границы зёрен.

Если бы это было так, то при прочих равных условиях наибольшую склонность к пластической деформации должны были бы обнаруживать мелкозернистые поликристаллы, характеризующиеся наибольшей протяжённостью границ зёрен.

Многочисленные экспериментальные данные достаточно убедительно свидетельствуют, однако, о том, что в действительности поликристаллы менее пластичны, чем монокристаллы.

Кстати сказать, сторонники этой точки зрения оставляют невыясненным самый механизм возникновения дислокаций на границах, то-есть те физические причины, по которым межкристаллическая прослойка могла бы быть рассматриваема как поставщик дислокаций, обуславливающих пластические свойства кристаллического зерна.

Обсуждая возможные причины наличия дислокаций в кристаллах, Коттрель склоняется к гипотезе Франка, согласно которой рост зародыша кристаллической фазы в расплаве или в паре возможен только при том условии, если этот зародыш содержит дислокации и, следовательно, дислокации появляются уже в процессе кристаллизации и «должны естественно встречаться, как детали строения реальных кристаллов» (стр. 228).

Бесспорно, реальные кристаллы содержат разнообразные пороки строения, возникшие в процессе кристаллизации, в том числе, вероятно, и некоторое количество искажений типа «дислокаций».

Напомним, однако, что по Коттрелю основным и особым свойством дислокаций, обуславливающим пластичность кристаллов, является их высокая подвижность. Если бы такие дислокации действительно возникали в процессе кристаллизации, то свежий, только что выросший кристалл должен был бы деформироваться при малейших усилиях, подвергаясь при этом упрочнению и постепенно утрачивая свои пластические свойства.

Для объяснения появления новых дислокаций, обеспечивающих сохранение способности кристаллов к пластическому деформированию, при этом неизбежно пришлось бы прибегнуть к дополнительному предположению о наличии какого-то иного механизма их образования. Что же касается самой гипотезы Франка, то она также встречает серьёзные возражения. Так, например, Бакли в своей статье «К вопросу о затруднениях современных теорий роста кристаллов»⁶, обсуждая гипотезу Франка, указывает, что весьма сомнительно, чтобы возникновение винтовых дислокаций играло существенную роль в процессе роста кристаллов.

Анализируя весьма обширный опытный материал о росте кристаллов, Бакли приходит к следующему заключению:

«Можно найти мало таких примеров, которые бесспорно указывали бы на применимость теории винтовых дислокаций, и имеются

сотни различных типов кристаллов и десятки тысяч таких отдельных кристаллов, относительно которых не может быть даже и подозрений, что винтовые дислокации играют для них скольконибудь существенную роль».

В начале параграфа «Возникновение дислокаций», являющегося самым последним параграфом обзора, Коттрель пишет:

«Оправданием того, что вопрос о возникновении дислокаций обсуждается лишь в конце, служит то, что этот вопрос является до сих пор наиболее неясной частью теории дислокаций» (стр. 227).

Такое заявление автора объёмистого обзора, написанного в 1949 г., представляется нам весьма показательным для характеристики современного состояния данной теории.

Уже после опубликования обзора Коттреля, Фишер и Кохендорфер⁷ на основании новых, более точных количественных расчётов снова пришли к заключению о том, что энергия образования отдельной дислокации в правильной решётке весьма велика — порядка $1 \div 2$ эв. Авторы высказывают предположение о том, что источником возникновения дислокаций могут являться перенапряжения, обусловленные пороками строения кристалла. Тем самым они солидаризируются с гипотезой Зейтца, критика которой была дана нами выше.

Перейдём теперь к обсуждению второго основного положения дислокационной гипотезы, согласно которому пластическая деформация осуществляется путём перемещения дислокаций вдоль плоскостей скольжения и, следовательно, невозможна, если кристалл не содержит дислокаций. Отсюда следует, что согласно дислокационной гипотезе способность к пластической деформации присуща только испорченной кристаллической решётке, содержащей искажения вполне определённого типа. Правильная кристаллическая решётка по Тейлору-Коттрелю не обладала бы свойством пластичности.

Согласуется ли такая точка зрения с опытными фактами? Экспериментальные наблюдения достаточно убедительно показывают, что чем совершеннее строение кристалла, тем ярче выражена его способность к пластическому течению.

Хорошо известно, в частности, что чем медленнее осуществляется рост монокристалла из расплава, тем совершеннее его строение и тем ниже его предел упругости⁸.

Отжиг и отдых кристаллов^{9,10}, как мы знаем, приводят к резкому снижению предела упругости. Известно также, что чем чище монокристалл, чем меньше он содержит примесей, тем он пластичнее¹¹. Хорошо известно, далее, что наличие в кристаллах каких-либо искажений, в частности, переходной зоны того или иного типа (границ зёрен в поликристаллах, или же границ блоков мозаики в монокристаллах) всегда является причиной торможения пластических сдвигов. Все эти факты, как нам кажется, находятся

в явном противоречии с исходными положениями дислокационной теории пластичности.

Объясняет ли дислокационная гипотеза другие экспериментальные закономерности, наблюдающиеся при изучении пластической деформации?

Напомним, что понятие дислокаций было введено в своё время Тейлором и другими, авторами прежде всего в надежде объяснить низкое практическое значение предела упругости кристаллов. Попытки теоретического расчёта предела упругости на основе дислокационных представлений, как отмечает сам Коттрель (стр. 195), пока не привели к удовлетворительному согласию с опытом. Заключение Коттреля о том, что «дислокация оказывается способной двигаться под действием самых малых внешних напряжений сдвига» (стр. 193), не является поэтому убедительным.

Отметим, далее, что такие хорошо известные экспериментальные закономерности, как кристаллографическая направленность пластического течения и наличие упрочнения на сдвиг также не получили достаточно строгого объяснения в рамках дислокационной теории. Имеющиеся попытки объяснения явления упрочнения базируются на столь большом количестве необоснованных и непоследовательных представлений, что, обсуждая теорию упрочнения Бюргерса; Кохендорфера и Лаурента, Коттрель вынужден признать: «несмотря на то, что уравнения течения, выведенные на основе этих соображений, могут быть приведены в согласие с некоторыми опытными фактами, довольно большое число введённых здесь допущений делает эту теорию не вполне убедительной» (стр. 211).

Поставим вопрос так: действительно ли объяснение пластических свойств кристаллов возможно только на базе представлений о существовании дефектов особого типа, именуемых «дислокациями» и присутствующих в кристаллах до начала деформации?

Основной характерной особенностью кристаллов является правильное, закономерное расположение образующих их атомов или ионов, а вовсе не наличие в них дефектов того или иного типа.

В то же время, способность к пластической деформации относится к числу специфических свойств кристаллических тел. При построении физической теории пластичности кристаллов естественнее поэтому было бы попытаться объяснить явление пластичности, прежде всего исходя из свойств правильной кристаллической решётки.

Я. И. Френкель и Т. А. Конторова¹² показали, что в правильной кристаллической решётке при определённых условиях возможен особый тип перемещения атомов, представляющий собой последовательный, взаимно-согласованный переход частиц данного атомного ряда из одних положений равновесия в другие и приводящий к постепенному сдвигу этого ряда по отношению к соседним атомным

рядам. Можно думать, что именно такой тип согласованного «коллективного» перемещения атомов, присущий прежде всего правильной кристаллической решётке, и лежит в основе явления пластической деформации.

В 1937 г. упомянутыми авторами был получен ряд уравнений, описывающих движение этого типа, в частности, были определены минимальная энергия, необходимая для начала сдвигообразования, скорость распространения сдвига и т. п. Через десять лет аналогичные уравнения были выведены Франком¹³ и Эшельби¹⁴, исходившими из макроскопических соображений теории упругости. Любопытно отметить, что сторонники дислокационной гипотезы пластичности пытаются трактовать теорию Френкеля и Конторовой в духе дислокационных представлений. Так, Коттрель приводит формулы Френкеля и Конторовой, утверждая, что они описывают движение особой разновидности «быстрых» дислокаций (стр. 203). Попытку аналогичного использования этих формул мы встречаем также и в монографии Кохендорфера¹⁵.

В действительности, исходные положения теории Френкеля и Конторовой существенно отличны от исходных положений теории дислокаций. По Френкелю и Конторовой способность к пластическому течению является одним из основных свойств правильной кристаллической решётки, тогда как, согласно воззрениям дислокационной теории, кристалл, не содержащий дислокаций, вообще не обнаруживает бы пластических свойств.

Разумеется, процесс постепенного распространения сдвига в правильной кристаллической решётке неизбежно сопровождается образованием сгущений и разрежений атомов в тех областях кристалла, которые в данный момент времени охвачены сдвигом. Эти сгущения и разрежения существуют, однако, лишь временно, только в процессе распространения сдвига, являясь следствием, но не причиной сдвигообразования. Они носят чисто динамический характер, существенно отличаясь тем самым от тех статических дислокаций, присутствие которых по Тейлору-Коттрелю является необходимой предпосылкой начала пластической деформации кристалла^{*)}.

В теории Френкеля и Конторовой намечены пути к объяснению таких специфических особенностей пластической деформации кристаллов, как её кристаллографическая направленность и наличие упрочнения на сдвиг. Кристаллографическая направленность пластических свойств может быть объяснена тем, что минимальная энергия сдвигообразования различна для разных кристаллографических направлений.

*) Во избежание недоразумений необходимо отметить, что Я. И. Френкель в своей книге «Введение в теорию металлов» динамические искажения, возникающие при сдвиге в правильной кристаллической решётке, также называет «дислокациями». Физическое содержание этого термина, однако, отлично от общепринятого.

Постепенный отток энергии в близлежащие слои кристалла, неизбежно сопровождающий процесс распространения сдвига, может обуславливать его постепенное затухание, являясь тем самым одной из причин упрочнения¹².

Существенным недостатком теории Френкеля и Конторовой является то обстоятельство, что она не доведена до такого состояния, при котором оказалось бы возможным её непосредственное количественное сопоставление с опытными данными. Она показывает, однако, что для объяснения явления пластической деформации кристаллов нет никакой необходимости прибегать к понятию статических дислокаций.

Теория пластичности кристаллов, развиваемая на протяжении ряда лет другим советским учёным А. В. Степановым¹⁶, также исходит из представления о том, что способность к пластической деформации является свойством правильной кристаллической решётки. По А. В. Степанову начало пластического течения является следствием потери упругой устойчивости кристаллической решёткой под воздействием внешних сил. Известно, что такая потеря упругой устойчивости в макроскопической системе наблюдается при достижении некоторого критического напряжения, которое значительно меньше прочности этой системы. Согласно представлению А. В. Степанова, потеря упругой устойчивости кристаллической решётки имеет место при некотором критическом напряжении, лежащем ниже теоретической прочности этой решётки. Потеря упругой устойчивости влечёт за собой перестройку решётки кристалла, в результате которой вся система переходит в более равновесное состояние. Очень важным моментом теории А. В. Степанова является учёт характера упругой анизотропии кристаллов. Большим достижением этой теории является то обстоятельство, что в ней впервые сделана попытка связать пластические свойства кристаллов с их упругими свойствами. Это даёт возможность привлечь теорию упругости анизотропных тел для выяснения возможных условий и характера разрушения кристаллов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя, можно сказать следующее. За 19 лет, прошедших со времени введения понятия «дислокаций», дислокационная теория пластичности, усиленно развиваемая рядом зарубежных учёных, не освободилась от тех внутренних противоречий, которые ей были присущи уже с самого начала, а также не достигла каких-либо существенных успехов на пути объяснения экспериментальных фактов.

При чтении современных объёмистых работ, посвящённых развитию дислокационной гипотезы и содержащих весьма сложные математические соотношения, может создаться впечатление, что мы имеем дело со строгой, хорошо разработанной микроскопической

теорией пластичности кристаллов. Это впечатление, однако, ошибочно. Авторы этих работ сосредоточили всё своё внимание на внешнем оформлении представлений, лишённых реального физического фундамента.

Для правильного построения физической теории пластической деформации прежде всего необходимо понять механизм этого явления. Современная дислокационная теория пластичности порочна в методологическом отношении, поскольку её исходные представления об особой роли и особых свойствах статических дислокаций и по сей день остаются физически необоснованными.

В процессе кристаллизации в реальных кристаллах, вероятно, могут образовываться как искажения типа «нониуса», так и искажения типа винтовых дислокаций.

Ни откуда не следует, однако, что такие искажения должны обладать особым свойством подвижности, существенно отличающим их от всех остальных дефектов решётки. Напротив, есть все основания думать, что эти искажения не имеют непосредственного отношения к возникновению пластического сдвига и что их наличие является лишь помехой для распространения пластической деформации.

В заключение считаем нужным отметить, что некритическое изложение дислокационной теории пластичности создаёт у советского читателя неправильное представление о современном состоянии вопроса и может помешать развитию других теорий, которые в дальнейшем могут оказаться более плодотворными.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. Taylor, Proc. Roy. Soc. A 145, 362, 388 (1934).
2. М. В. Классен-Неклюдова и Т. А. Конторова, УФН 26, вып. 2, 217 (1944).
3. J. M. Burgers, Proc. Roy. Acad. Sci. Amsterdam 42, 293 (1939); Proc. Phys. Soc. London 52, 23 (1940).
4. Ф. Зейтц, Физика металлов, Гостехиздат, стр. 117—118 (1947).
5. М. В. Классен-Неклюдова, ЖЭТФ, 6, 6, 598 (1936).
6. Buckley, Zeits. f. Elektrochemie 56, 4, 275 (1952).
7. P. Fischer und A. Kochendörfer, Zeits. f. Naturforschung 7a, 11, 735 (1952).
8. W. Boas und E. Schmid, Zeits. f. Phys. 54, 16 (1929).
9. И. В. Обреимов и А. В. Шубников, ЖРФХО, 58, 817 (1926).
10. F. Blank, Zeits. f. Phys. 55, 289 (1929).
11. G. Sachs und I. Weerts, Zeits. f. Phys. 62, 475 (1930).
12. Т. А. Конторова и Я. И. Френкель, ЖЭТФ 8, 89, 1340 (1938).
13. F. Frank, Proc. Phys. Soc. 62, 131 (1949).
14. Eshelby, Proc. Phys. Soc. 62, 307 (1949).
15. A. Kochendörfer, Plastische Eigenschaften von Kristallen und metallischen Werkstoffen. Berlin, 1941—1944.
16. А. В. Степанов, ЖЭТФ 19, 4, 492 (1949); ЖЭТФ 20, 10, 1194 (1950).