

## ELECTRIC FIELDS AND CRYSTAL PLASTICITY

L. B. ZUEV

*Discussed is the nature of electric field effect onto strength and plasticity of different types of solids. Mechanisms of electrostatic field effect onto charged point-wise and linear defects (dislocation) in insulator crystals are analyzed. The nature of electroplastic phenomena in metals, associated with action of electric current pulses of large magnitude, and its technological applications are also considered.*

*Рассмотрена природа влияния электрического поля на прочность и пластичность твердых тел различной природы. Проанализированы механизмы эффектов, связанные с влиянием электростатического поля на заряженные точечные и линейные дефекты (дислокации) в кристаллах диэлектриков. Обсуждены природа электропластического эффекта в металлах, связанного с действием электрических токовых импульсов большой амплитуды, и его применение на практике.*

© Зуев Л.Б., 1998

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ПЛАСТИЧНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ

Л. Б. ЗУЕВ

Томский государственный университет

Современная физика ставит своей задачей определить электрическую структуру всех встречающихся в природе веществ и вывести законы физических и химических явлений из основных законов взаимодействия электрических зарядов и из законов их движения.

*И.Е. Тамм. Основы теории электричества*

### ВВЕДЕНИЕ

Силы взаимодействия между частицами в твердых телах имеют электромагнитную природу, причем величины положительных и отрицательных электрических зарядов в теле в точности равны друг другу, что обеспечивает его макроскопическую электрическую нейтральность. Однако, поскольку любой кристалл содержит дефекты разных типов, искажающие идеальную структуру, отдельные его микрообъемы неидентичны друг другу, и можно предположить, что строгое равновесие зарядов в локальной области вблизи дефекта не выполняется. В этом случае можно ожидать, что электрические поля в диэлектриках и электрические токи в проводниках будут оказывать действие на области кристалла, содержащие дефекты. Поскольку за пластичность ответственны именно дефекты, то нетрудно прийти к выводу, что электрическое воздействие может эффективно менять характер пластического течения кристаллов.

По-видимому, первым описал такой эффект французский физик Дюфор в 1856 году. Он обнаружил, что прочность медной проволоки после пропускания электрического тока уменьшается, а железной — увеличивается. Это было первое указание на то, что действие электрического тока не сводится только к выделению джоулева тепла  $Q \sim I^2$  (закон Джоуля—Ленца).

Идея управления механическим поведением твердых тел с помощью электрических полей очень заманчива и кажется сравнительно просто реализуемой. Этим объясняется большой интерес, проявленный исследователями к проблеме электропластического эффекта. Именно так принято называть это явление в научной литературе [1]. В соответствии с реакцией твердых тел на электрические поля можно ожидать, что существуют две разновидности эффекта, характерные для диэлектриков и проводников. Их удобно рассматривать по отдельности.

### ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Понять существо дела можно на примере щелочно-галогенидного кристалла, например NaCl. Его структура определяется правильным чередованием симметрично расположенных в пространстве положительных ионов  $\text{Na}^+$  и отрицательных  $\text{Cl}^-$ . Требование электронейтральности сводится к точному равенству чисел ионов каждого знака в кристалле. Но надо иметь в виду, что в реальном кристалле наряду с однозарядными ионами  $\text{Na}^+$  всегда присутствуют двухзарядные, например  $\text{Ca}^{2+}$ . Требование сохранения электронейтральности в этом случае вызывает необходимость появления в одной из позиций, где в решетке должен был бы находиться ион  $\text{Na}^+$ , пустого места — вакансии, которая обладает эффективным отрицательным электрическим зарядом  $q_v = e$  ( $e$  — заряд электрона). Только в этом случае, как легко убедиться, сохраняется электронейтральность. Такие заряды приводят к возникновению ионного тока проводимости, носителями которого являются именно заряженные вакансии.

Итак, в объеме всего кристалла электронейтральность достигнута, но отдельные его микрообъемы могут обладать электрическим зарядом, что делает их чувствительными к электрическому полю. Последнее может действовать на них силой Кулона, пропорциональной величине электрического заряда. Особенно это существенно, когда избыточный заряд приобретает дислокация — дефект, ответственный за пластическую деформацию [2]. Происхождение такого заряда понять нетрудно. Распределение элементарных зарядов вдоль линии дислокации в идеальном кристалле и кристалле с примесями различается. Во втором случае зарядов одного знака (например, положительных) больше, дислокационная линия оказывается заряженной, и, следовательно, на единицу ее длины действует сила Кулона

$$F_E = q_l E. \quad (1)$$

Здесь  $q_l$  — электрический заряд единицы длины дислокационной линии,  $E$  — напряженность электростатического поля, в которое помещен кристалл. Конечно, эта сила невелика, но и ее бывает достаточно, чтобы вызвать движение дислокаций и пластическую деформацию. Наблюдение движения дислокаций в таких условиях было первым доказательством того, что они могут быть электрически заряжены. Со стороны внешних напряжений  $\sigma$  на ту же единицу длины дислокационной линии также действует сила [2]

$$F_\sigma = b\sigma, \quad (2)$$

( $b$  — вектор Бюргерса дислокации), и она тоже приводит к движению дислокаций. Можно создать ситуацию, когда на дефекты действуют одновременно обе силы [3], возможно по-разному ориентированные, причем  $F_\sigma \approx F_E$ .

Такие эксперименты [3] были проведены на кристаллах NaCl по схеме, показанной на рис. 1. Оказывается, что в зависимости от ориентации электрического поля относительно линии дислокации может наблюдаться как ускорение (кривая 2), так и замедление (кривая 1) их движения. При этом возникает естественная возможность оценить плотность заряда дислокационной линии в кристаллах NaCl. Вычисления показывают, что эта величина составляет  $\sim 10^{-11}$  Кл/м. Интересно, что эта очень малая величина (всего около одного элементарного заряда на 10 параметров решетки) приводит ко вполне экспериментально наблюдаемым эффектам.

Расскажем теперь о поведении в электрическом поле своеобразных кристаллических объектов, называемых обычно усами (по-английски whiskers) или нитевидными кристаллами из-за их формы. Если ограничиться только кристаллами NaCl, то такие объекты имеют характерные размеры  $\sim 10^{-2} \times 10^{-5} \times 10^{-5}$  м. То есть это тонкие и сравнительно длинные кристаллы, форма которых вполне объясняет их название. Для нас важно, что такие кристаллы вырастают бездислокационными, практически идеальными. Выяснилось, что усы обладают электрическим зарядом и если их поместить в ориентированное перпендикулярно оси кристалла электрическое поле напряженностью  $\sim 10^4$  В/м, то они изгибаются. Следя в микроскоп за отклонением кончика кристалла от первоначального положения, можно построить кривую, показанную на рис. 2. Ее сложная форма указывает, что причин эффекта, по-видимому, несколько. Первоначально кристалл просто изгибается под действием силы электрического происхождения. Одновременно внутри кристалла в электрическом поле диффундируют вакансии, так что с течением времени у поверхности возникает их

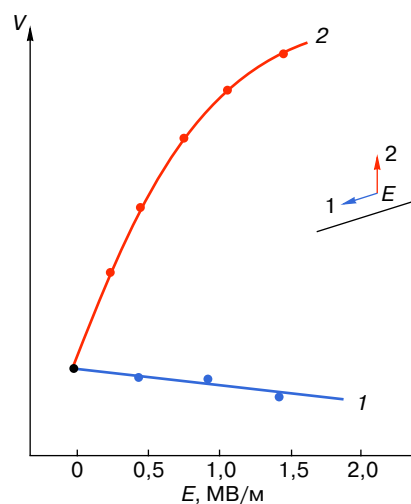
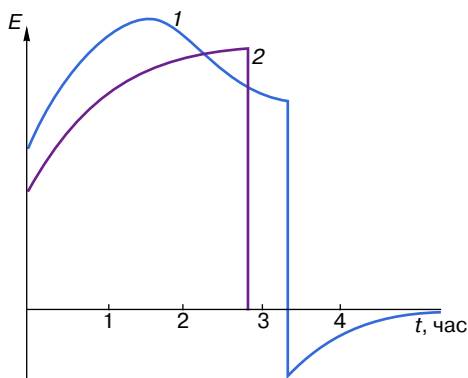


Рис. 1. Ориентационная зависимость подвижности дислокаций в кристаллах NaCl



**Рис. 2.** Кривые нагружения и разгрузки усов NaCl при длительном действии электрического поля (1) и механической нагрузки (2)

избыток. Заряженные вакансии начинают отталкиваться друг от друга, что в некоторой степени компенсирует первоначальный изгиб, и кристалл начинает разгибаться. Если в какой-то момент электрическое поле отключить, то изгиб кристалла сразу меняется на противоположный, а потом постепенно спадает до нуля. Интересно, что если кристалл изогнуть механической нагрузкой (мы делали это обдувая его воздухом), то временная зависимость изгиба значительно проще, что можно видеть на том же рис. 2. При механическом нагружении диффузии вакансий нет, и отсутствуют эффекты, связанные с нею.

Интересно, что похожий изгиб в электрическом поле наблюдался на так называемых отрицательных усах [4]. Так называются кристаллографически ограниченные поры в кристаллах примерно такой же формы и размеров, как и обычные усы. В этом случае эффект имеет чисто диффузионную природу и связан с диффузией по поверхности такого уса. Но тем не менее возможно даже разрушение (разрыв) таких пор в электрическом поле, в точности подобное разрушению обычных усов.

### ЭЛЕКТРОСТИМУЛИРОВАННАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Подавляющее большинство металлов и сплавов используются в практике в пластически деформированном состоянии. С физической точки зрения металл — это электронная жидкость, в которую погружены положительно заряженные ионы, образующие его кристаллическую решетку. Возникает заманчивая идея использовать электрические поля для пластической деформации металлов, исключив, если это возможно, механические устройства, предназначенные для деформации: прокатные станы, молоты, штампы и т.п. Конечно, это фантастическое предположение, но оказалось, что пропускание достаточно мощных импульсов электрического

тока плотностью  $\sim 1 \text{ Га/м}^2$  ( $10^9 \text{ А/м}^2$ ) позволяет существенно повлиять на динамику процесса пластической деформации [1, 5]. Приведенная выше необходимая для реализации эффекта плотность электрического тока объясняет трудности его реализации: такую плотность тока можно создать только в сравнительно тонких проводниках с размерами поперечного сечения всего около нескольких кв. миллиметров. Иначе может не хватить мощности электростанции!

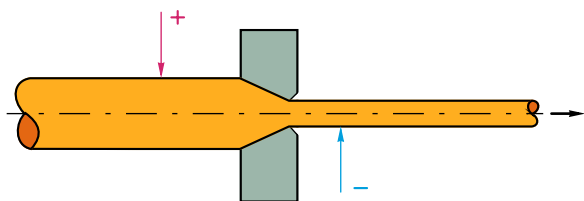
Каков же механизм воздействия мощных электрических импульсов на пластичность металлов? Впервые мы наблюдали микроскопическое проявление такого эффекта в опытах по движению дислокаций в монокристаллах Zn [6] аналогично тому, как это было описано выше для кристаллов NaCl. Оказалось, что в этом случае также наблюдается ускорение движения дислокаций. Однако говорить о наличии заряда на дислокационных линиях в этом случае, конечно, нельзя: любой заряд в металле экранируется электронным газом на расстоянии всего в несколько параметров решетки. Объяснение наблюдаемого эффекта надо искать в другой области. И оно было найдено. Оказывается, что движущиеся при протекании тока электроны рассеиваются на дислокациях и передают им свой импульс. Это приводит к появлению дополнительной силы, действующей на дислокацию. Такое явление было названо электронным ветром [7], причем термин отвечает существу дела в этом случае.

Дислокация есть неоднородность решетки, и электроны проводимости, движущиеся вдоль проводника с дрейфовой скоростью  $v$ , неминуемо будут терять ее в момент столкновения с ядром дислокации. Это и вызовет возникновение дополнительной силы. Величину этой силы можно приблизительно оценить [7] из следующих простых рассуждений. Представим дислокацию единичной длины как площадку размером  $b$ . Тогда за единицу времени с нею столкнется  $nv$  электронов, каждый из которых имеет импульс  $p$ . Тогда общий импульс есть  $nvpr$ , а сила  $bnvpr$ . Используя закон Ома  $j = nev$ , получаем

$$F = \frac{bp}{e} j. \quad (3)$$

Эта формула была проверена в экспериментах с микроскопическими шариками Cu, которые припекались к медной пластинке [7]. Хорошее совпадение расчетных и наблюдаемых величин подтвердило существование механизма электронного ветра.

Теперь необходимо рассказать о практическом применении такого эффекта при пластической деформации металлов. Наиболее удобно использовать его в случае волочения проволоки [5]. Во-первых, проволока обычно имеет небольшое сечение, и сравнительно нетрудно обеспечить протекание тока достаточной плотности, а во-вторых, такой ток легко подать в очаг деформации (рис. 3). Построенные



**Рис. 3.** Схема волочения проволоки с применением электрического поля

для этих целей специальные генераторы электрических импульсов большой мощности были применены при волочении проволоки на Западно-Сибирском металлургическом комбинате. Их применение дало большой и интересный эффект: прежде всего усилие, необходимое для протаскивания проволоки через фильеру, снизилось на 15–20%, сократилось число обрывов проволоки во время волочения, процесс стал более устойчивым. Но самое интересное состоит в том, что изменились механические свойства проволоки. На ее поверхности вместо твердого слоя, характерного для обычного процесса, образовался мягкий, проволока стала более пластичной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрическое воздействие на твердые тела ни в коем случае не сводится только к их нагреву. Дефекты структуры, определяющие механические свойства материалов, обладают электрическими зарядами и немедленно отзываются на приложение полей или протекание электрического тока. Это особенно существенно при малых размерах объектов, например в современных микроминиатюрных электронных

устройствах. Они могут не только постепенно изменять свое состояние, но и вообще разрушаться при работе, которая состоит, собственно, в определенной реакции на действие электрического сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
2. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высш. шк., 1983. 144 с.
3. Зуев Л.Б. Физика электропластичности щелочно-галогенидных кристаллов. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.
4. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах. М.: Наука, 1970. 180 с.
5. Громов В.Е., Зуев Л.Б., Козлов Э.В., Целлермаер В.Я. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. М.: Недра, 1996. 270 с.
6. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилов В.Ф. Подвижность дислокаций в монокристаллах Zn при действии импульсов тока // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 84–85.
7. Гегузин Я.Е. Живой кристалл. М.: Наука, 1981. 192 с.

\* \* \*

Лев Борисович Зуев, доктор физико-математических наук, профессор Томского государственного университета, зам. директора Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской Академии наук. Автор 200 научных статей и 2 монографий.