

Е. Д. ЩУКИН, В. И. САВЕНКО, Л. А. КОЧАНОВА,
академик П. А. РЕБИНДЕР

О ЗАРОЖДЕНИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФТОРИСТОГО ЛИТИЯ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ

Контактные взаимодействия лежат в основе широкого круга процессов, связанных с граничным трением, износом и обработкой твердых тел (¹⁻³). Поэтому большой интерес представляет анализ механизма и условий зарождения элементарной пластической деформации в поверхностном слое твердых тел при их контакте. В данной работе изучен процесс формирования дислокационной структуры в поверхностном слое монокристалла LiF при скольжении по плоскости скола (001) в направлении (100) корундовой иглы с радиусом закругления $R = 26 \pm 4 \mu$ на воздухе и в вазелиновом масле. Поджим индентора к поверхности осуществлялся с помощью видоизмененного нами прибора, принципиальная схема которого описана ранее (⁴). Сила поджима индентора к образцу варьировалась в интервале $F = 1-50$ дин, скорость перемещения индентора составляла 0,013 см/сек. Образцами монокристаллов LiF служили пластинки $1 \times 5 \times 8$ мм³, выколотые по плоскости спайности, с исходной плотностью дислокаций 10^4 см⁻². Микроскопическое исследование поверхности по окончании процесса показало, что при использованных очень малых силах поджима следы, оставленные индентором на поверхности, проявляются только после травления образцов (в 10% водном растворе FeCl₃ (⁵)); до травления никаких царапин или других следов от индентора на поверхности образцов не обнаруживается. Необходимо подчеркнуть это принципиальное отличие описываемых опытов от известного метода микроцарапания (^{6, 7}), когда нагрузки на индентор значительно выше (на несколько порядков) и наблюдается явный след движения индентора — риска, микроцарапина, наплывы, т. е. результат глубоких пластических деформаций и разрушения.

След от индентора в наших опытах представляет собой ряд ямок травления, соответствующих выходам дислокационных полупетель, расположенных вдоль пути индентора (рис. 1) (далее такую структуру будем называть «трассой» индентора). Опыт показал, что при силах F , меньших 1 дин на воздухе и 3 дин в вазелиновом масле, индентор не оставляет на поверхности кристалла даже одиночных дислокационных полупетель. Это означает, что либо процесс движения индентора сопровождался лишь упругой деформацией поверхности, либо возникшие при движении индентора полупетли имели малое время жизни и исчезли до начала процесса травления (вышли на поверхность, аннигилировали). Гилман и Джонсон отмечали, что для LiF такой возможностью обладают полупетли, размер которых не превышает 3μ (⁵). Иными словами, следует иметь в виду, что не существует резкой границы, отделяющей начальную стадию элементарной пластической деформации от упругой; это же проявляется и в известном эффекте «неупругости» в условиях внутреннего трения.

При больших силах F , в данном случае превышающих 1 дин на воздухе и 3 дин в вазелиновом масле, на трассе появляются отдельные ямки травления («устойчивые» дислокационные полупетли). С ростом силы F их плотность растет и трасса приобретает прерывистый характер: по ее длине чередуются участки, заполненные ямками травления и свободные

от них. Число участков трассы, заполненных ямками травления, закономерно растет с увеличением приложенной силы. При достижении значения $F = 50$ дин трасса индентора становится непрерывной — ямки травления сплошь заполняют ее; линейный размер ямки травления ~ 10 мкм. Необходимо иметь в виду, что и в этом случае пластическая деформация

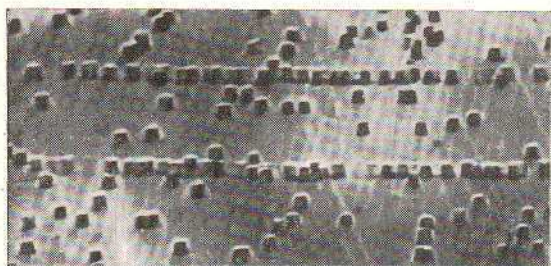


Рис. 1. Дислокационная структура, возникающая в процессе скольжения индентора по поверхности LiF на воздухе при силе поджима $F = 15$ дин. $125\times$

не приводит к сплошному повреждению поверхности, а связана с возникновением индивидуальных дислокационных полупетель на части трассы, составляющей тысячную или даже десятитысячную долю от всей трассы индентора. Следует отметить, что ямки травления на трассах, соответствующих силам $F = 10$ дин и меньше, имеют плоскостную форму. Определить при этом тип возникших дислокационных полупетель не представляется возможным. Однако при больших силах на трассах появляются остроконечные ямки травления; симметрия и относительное расположение некоторых из них свидетельствуют о наличии на трассах дислокационных полупетель краевого типа. Для количественной характеристики полученной дислокационной структуры может быть использована зависимость линейной плотности дислокаций на трассах от максимального давления на поверхности

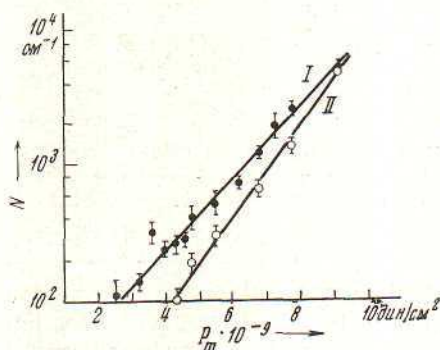


Рис. 2. Зависимости плотности дислокаций N от величины максимального нормального напряжения P_m , полученные при микродеформации LiF на воздухе (I) и в вазелиновом масле (II). Усреднение по 120 образцам

образца под индентором (рис. 2). Из описанных условий опыта следует, что деформация LiF в объеме под индентором носит преимущественно упругий характер; это позволило использовать для расчета максимального давления под индентором (P_m) решение контактной задачи Герца (⁸).

Сравнение результатов опытов, проведенных на воздухе и в инертной смазочной среде — неполярном вазелиновом масле (рис. 2), свидетельствует о том, что наличие инертной смазки в зоне контакта приводит к снижению плотности дислокаций на трассах; с увеличением P_m эффективность действия смазки, определяемая разницей в плотности дис-

локаций на трассах, проведенных в масле и на воздухе при одинаковой силе F , уменьшается и исчезает при $P_m = 10^{10}$ дин/см².

Сопоставление приведенных зависимостей плотности дислокаций от давления в зоне контакта позволяет сделать предположение о механизме зарождения дислокаций в условиях граничного трения. Как следует из на-

ших опытов, при трении деформация и адгезия взаимосвязаны: один процесс обуславливает и усиливает другой, вследствие чего трудно определить относительный вклад этих факторов в процесс граничного трения. Действительно, адгезия происходит, в значительной степени, лишь поскольку протекает пластическая деформация и обнажаются ступеньки ювенильной поверхности. Вместе с тем адгезия, вызывая тангенциальную силу и, соответственно, дополнительные компоненты напряжения при смещении контактирующих поверхностей способствует пластической деформации. Полученные результаты хорошо согласуются с современными представлениями о природе граничного трения (^{1, 9, 10}).

Однако экспериментальные данные не позволяют однозначно указать, что именно является первопричиной зарождения элементарной пластической деформации при контактном взаимодействии. С одной стороны, возможно, что акт разрыва адгезионных связей, возникающих в зоне контакта при поджиге индентора к образцу, сопровождается рождением дислокационной полупетли. Иными словами, можно предположить, что при малых силах $F \leq 3$ дин для рождения устойчивых дислокационных полупетель не хватает напряжений, созданных непосредственно силой F . Роль дополнительных напряжений играют при этом напряжения, возникающие в поверхностном слое при тангенциальном смещении индентора и связанные с преодолением адгезионных связей.

Как было указано выше, при силах $F \leq 3$ дин введение смазки приводит к полному исчезновению ямок травления дислокаций на трассах. Очевидно, присутствие в зоне контакта вазелинового масла препятствует в этих условиях образованию адгезионных связей между поверхностями LiF и индентора (экранирующее действие смазки) и приводит почти к полному исчезновению тангенциальной силы (силы трения).

При значительных силах $3 < F \leq 50$ дин, введение смазки приводит не к исчезновению дислокаций на трассах, а лишь к уменьшению их плотности. По-видимому, в этой области усилий происходит выдавливание из части контактов (или прорыв) смазочной пленки; при этом наличие вазелинового масла лишь уменьшает (но не сводит к нулю) вероятность образования адгезионных связей между сопряженными поверхностями, обуславливающих тангенциальную силу трения.

С другой стороны, в области усилий $3 < F \leq 50$ дин следует иметь в виду возможность рождения устойчивых дислокаций непосредственно под действием напряжений, созданных в зоне контакта лишь силой F . Введенные таким способом дислокации, очевидно, в свою очередь, могут служить активными центрами образования адгезионных связей между атомами поверхности образца и индентора (^{9, 10}). Тангенциальное усилие, возникающее в результате преодоления адгезии, в этом случае может вызвать расширение дислокационных полупетель, что приводит к созданию устойчивых дислокационных полупетель, т. е. к необратимой пластической деформации. В присутствии вазелинового масла, препятствующего адгезии, дислокационные полупетли не могут увеличиться до критических размеров, при которых становятся устойчивыми, и захлопываются. Следовательно, в обоих случаях можно считать, что как возникновение адгезионных связей между атомами сопряженных поверхностей, обуславливающее появление тангенциальной силы сопротивления движению индентора (силы трения), так и преодоление этого сопротивления, т. е. разрыв адгезионных связей, играют определенную роль в зарождении элементарных пластических деформаций при контактных взаимодействиях, сопровождающих процесс трения.

Таким образом, в данной работе предложен метод непосредственного экспериментального наблюдения элементарных актов зарождения пластической деформации в условиях граничного трения. Следует полагать, что, как показывают уже и приведенные данные, это позволит по-новому подойти к анализу механизма граничного трения.

Авторы выражают благодарность И. Г. Берзиной за предоставление кристаллов фтористого лития и Р. К. Юсупову и Е. А. Амелиной за помощь в проведении эксперимента.

Институт физической химии
Академии наук СССР

Поступило
19 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. В. Крагельский, Трение и износ, М., 1962. ² А. С. Ахматов, Молекулярная физика граничного трения, М., 1963. ³ С. Я. Вейлер, В. И. Лихтман, Действие смазок при обработке металлов давлением, Изд. АН СССР, 1960. ⁴ Е. Д. Щукин, Р. К. Юсупов и др., Колл. журн., 31, № 6 (1970). ⁵ Сборн. Дислокации и механические свойства кристаллов, М., 1960; И. Г. Берзина, И. Б. Берман, ДАН, 174, № 3 (1967). ⁶ Я. Е. Гегузин, А. А. Шпунт, ДАН, 130, № 4, 755 (1960). ⁷ Ю. С. Боярская, М. И. Вальковская, ФТТ, 5, № 2, 518 (1963). ⁸ С. П. Тимошенко, Сопротивление материалов, 2, «Наука», 1965. ⁹ Ю. А. Красулин, Теоретич. и эксп. хим., 3, № 1, 58 (1967). ¹⁰ Б. И. Костецкий, О. Б. Шульга, ДАН, 188, № 1, 80 (1969).