

05.1

© 1992

О ФОРМИРОВАНИИ СКВОЗНЫХ ФИГУР  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В КРИСТАЛЛАХ

М.Ю. П о п о в

Сквозные фигуры пластической деформации в кристаллах образуются при воздействии на поверхность кристалла сосредоточенной нагрузкой. Они достаточно подробно исследованы в работах [1, 2], где сделано предположение, что сквозная фигура представляет собой систему вложенных призм с квадратным основанием и общей осью симметрии, последовательно смещенных вдоль оси одна относительно другой. Рост нагрузки приводит к последовательному образованию новых призм большего поперечного размера, вмещающих в себя ранее образовавшиеся призмы. Боковая поверхность этих призм совпадает с действующей в  $CS I$  системой скольжения, а их образование не сопровождается двойникованием.

Однако остается открытым вопрос, каким образом происходит формирование таких призм, поскольку поле напряжений, возникающее при-indentировании и соответствующее известной задаче Буссинеска, позволяет сформироваться площадкам скольжения только вблизи точки-indentирования. Целью данной работы является исследование этого вопроса.

## Э к с п е р и м е н т

В опытах использовались кристаллы  $CS I$  размера  $6 \times 6 \times 5$  мм, вырезанные перпендикулярно оси  $[100]$ , с прочностью на сдвиг по плоскости скольжения  $0.15$  МПа. Ин-indentирование производилось в направлении  $[100]$ . Нагрузка на ин-indentор росла линейно по времени со скоростью около  $100$  Н/с. При достижении требуемой величины осуществлялась разгрузка со скоростью, много большей скорости нагружения. Ин-indentор имел форму конуса с углом при вершине  $60^\circ$ .

Форма образовавшейся пирамиды на противоположной ин-indentированию стороне исследовалась с помощью микроскопа ОРМ-1. В микроскоп визуально видны ступеньки на поверхности пирамиды, которые опоясывают ее, переходя с одной грани на другую. На рис. 1 представлена фотография пирамиды, полученной при нагрузке на ин-indentор  $3.5$  Н.

Размер основания и высота пирамид в исследованном диапазоне нагрузок (до  $30$  Н) росли пропорционально приложенной на ин-indentор нагрузке.

При нагрузке на ин-indentор  $0.4$  Н и меньше сквозная фигура не образуется. Области нагрузок  $0.4$ – $1.4$  Н соответствует также резкая смена зависимости диаметра отпечатка ин-indentора от нагрузки.

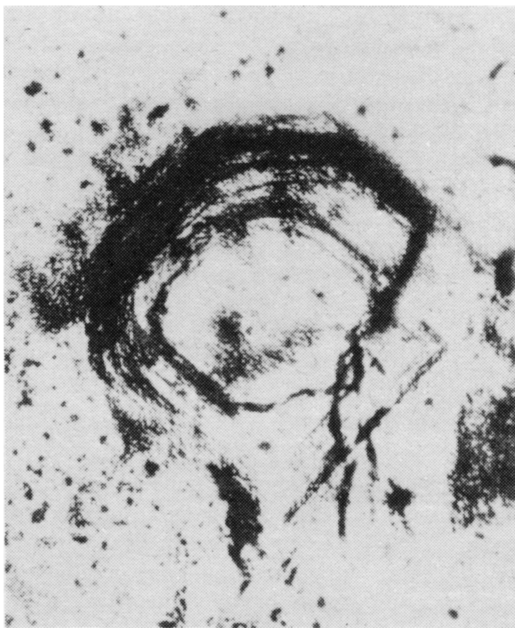


Рис. 1. Фотография пирамиды, полученной при нагрузке на индентор 3.5 Н (размер основания пирамиды 0.16 мм).

Это свидетельствует о том, что существует критическая нагрузка на индентор, после которой начинается образование сквозной фигуры.

Наблюдение сквозных фигур с помощью поляризационного микроскопа МИН-8 в направлении, перпендикулярном оси индентирования, выявило следующие особенности.

1. Поверхность индентирования и пирамида на противоположной стороне образца соединены параллельными узкими поляризованными „столбиками“, которые, по-видимому, соответствуют областям остаточных напряжений вблизи ребер призм, из которых состоит сквозная фигура.

2. Не наблюдалось „столбиков“, которые обрывались бы не на поверхности образца. При нагрузках 0.4 Н и меньше сквозные фигуры и поляризованные столбики обнаружены не были.

В работе исследовалось также пластическое деформирование при внедрении штампа. В экспериментах использовался штамп с квадратным основанием со стороной 1 мм. Ребра штампа располагались параллельно плоскостям (100), нагружение производилось в направлении [001], нагрузка росла со скоростью 100 Н/с.

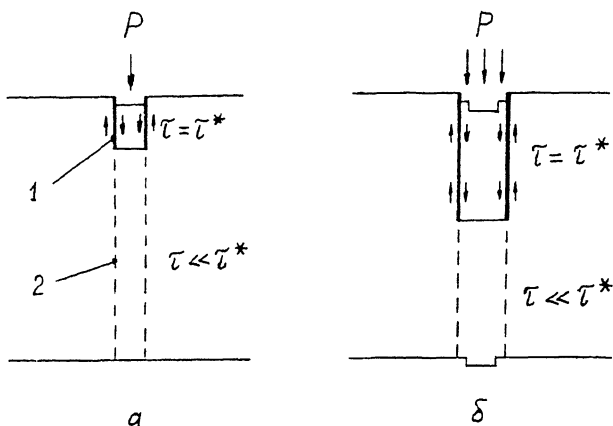


Рис. 2. а) 1 – сформировавшиеся границы призмы, по которым осуществляется скольжение. Следовательно, на них действует касательное напряжение  $\tau$ , равное пределу текучести; 2 – будущая граница призмы. б) Рост нагрузки приводит к появлению новых призм, вмещающих в себя ранее образовавшиеся.

Проведенное исследование выявило существенные отличия от случая нагружения индентором.

1. При нагрузке на штамп 25 Н на поверхности образовавшейся пирамиды не было обнаружено ступенек (при нагрузке 9 Н сквозная фигура не образовывалась).

2. Контрастные поляризованные столбики, как в случае индентирования, не наблюдались.

3. При нагрузке на штамп 9 Н поляризованная область распространялась на глубину около 2.5 мм, не достигнув противоположной поверхности.

#### Обсуждение результатов

Как уже отмечалось выше, из-за особенностей поля напряжений, возникающего при индентировании, призмы, из которых состоит сквозная фигура, могут зародиться только в окрестности точки индентирования. После зарождения каждой новой призмы, вмещающей в себя предыдущие, при рассмотрении ее дальнейшего роста в квазистационарном случае возникает задача, аналогичная задаче о внедрении штампа. Схематично этот процесс показан на рис. 2. Однако, как показали проведенные эксперименты, имеются существенные отличия в проявлении механизмов образования сквозных фигур при индентировании и при внедрении штампа. В последнем случае пластическое течение развивается квазистационарно.

Эти отличия могут быть обусловлены тем, что при индентировании в направлении скольжения распространяется волна сжатия. Волна должна излучаться при так называемом разрыве связей по достижении критического сдвигового напряжения в локальной

области вблизи точки индентирования. На фронте волны скачкообразно изменяются напряжения внутри призмы и устанавливается режим скольжения по ее границам. Этот процесс аналогичен распространению волны сжатия в стержне с трением на границах.

Последняя задача подробно исследована в работе [3]. Пользуясь результатами, приведенными в этой работе, можно оценить расстояние  $H$ , на которое такая волна может распространиться. Если считать, что на торец призмы передается вся нагрузка, приложенная к индентору, а размер фигуры  $a$ , как следует из эксперимента, пропорционален приложенной нагрузке  $P$ , то  $H$  не зависит от  $P$ :

$$H = \frac{1}{2\tau^*k} = 50 \text{ мм},$$

где  $\tau^*$  – предел текучести,  $k = \frac{\alpha}{\rho} = 0.06 \text{ мм}$ .

Следовательно, формирующаяся призма в условиях проведенных экспериментов всегда должна достигать противоположной поверхности (толщина образца 5 мм). Поэтому в опытах не наблюдалось поляризованных столбиков, обрывающихся внутри образца.

Таким образом, возникновение площадок скольжения при индентировании кристаллов  $CaI$  может быть объяснено предложенной динамической моделью.

В заключение автор выражает глубокую благодарность В.Г. Курдюмову за полезные обсуждения и замечания, высказанные при подготовке статьи.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К л а с с е н – Н е к л ю д о в а М.В., У р у с о в – с к а я А.А. // Труды Института кристаллографии АН СССР. 1955. В. 11. С. 146–151.
- [2] У р у с о в с к а я А.А. // Труды Института кристаллографии АН СССР. 1956. В. 12. С. 172–179.
- [3] Н и к и т и н Л.В. // Успехи механики. 1988. Т. 11. № 4. С. 53–106.

Институт физики  
высоких давлений РАН,  
Троицк

Поступило в Редакцию  
19 марта 1992 г.