

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Э. С. ЯКОВЛЕВА и М. В. ЯКУТОВИЧ

**РОЛЬ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ**

*(Представлено академиком И. П. Бардиным 28 IV 1953)*

Пластическая деформация в поликристалле распределяется неравномерно по объему материала. Неодинаково деформируются отдельные зерна вследствие анизотропии их свойств и различия в ориентировке. В пределах каждого зерна деформация также распределена неравномерно. Об этом свидетельствует образование следов скольжения и двойников в зернах деформированного металла <sup>(1)</sup>. Исследование прозрачных кристаллических материалов в поляризованном свете также подтверждает существование крайне неравномерного распределения деформации как в образце в целом, так и в пределах каждого входящего в него зерна <sup>(2)</sup>. Кроме того, имеются указания на то, что пограничные и внутренние области зерен участвуют в деформации не в равной степени. Так например, обычные статические испытания показывают, что около границ пластическая деформация проходит в меньшей или большей степени, чем в остальных участках зерна металла <sup>(3)</sup>. В опытах же на ползучесть деформация сопровождается выявлением границ зерен и появлением рельефа на поверхности образцов <sup>(4)</sup>. Такой характер деформации заставляет предполагать существование локализации деформации у границ зерен. Очевидно, что доля участия в пластической деформации пограничных и внутренних областей зерна меняется с условиями деформирования.

В настоящей работе было изучено влияние температуры на локализацию деформации по границам зерен при двух различных способах деформирования. В одном случае деформирование производилось с постоянной скоростью растяжения, равной 24% в час, в другом материал тек с гораздо меньшей скоростью под постоянной нагрузкой. Исследование производилось на образцах, которые были монокристалльными по сечению и состояли из 2—3 кристаллов по длине. Поведение металла у границ зерен в таких образцах не было осложнено, как в поликристалле, влиянием окружающих зерен.

Материалом для исследования служил алюминий чистоты 99,6%. Образцы имели форму полос размером 1 × 2 × 50 мм. Одна сторона образцов полировалась и на ней велось наблюдение за изменением формы и рельефа поверхности в процессе деформирования.

Температура испытаний менялась в опытах с постоянной скоростью растяжения от 20 до 600°, в опытах с постоянной нагрузкой от 400 до 600°.

Результаты исследования. Опыты с постоянной скоростью растяжения показали, что при низких температурах (20°) сдвиговая деформация протекает возле границ зерен в меньшей степени, чем в теле зерна (рис. 1 на вклейке). Граница как бы тормозит развитие дефор-

мации. С повышением температуры испытания тормозящее действие границ уменьшается (рис. 2). При  $400^{\circ}$  и выше влияние границ зерен на развитие пластической деформации становится незаметным (рис. 3).

Вид полос скольжения с температурой меняется. Чем выше температура испытания, тем толще и волнистее становятся следы скольжения (рис. 1, 2, 3).

Характер разрушения с температурой меняется мало. Во всех случаях разрушению предшествует образование длинной пологой шейки. Разрушение происходит по зерну металла.

Опыты, проведенные при постоянной нагрузке и сравнительно невысокой температуре ( $400^{\circ}$ ), дали результаты, мало отличающиеся от результатов испытания с постоянной скоростью растяжения.

Испытания при  $550-600^{\circ}$  показали отличное от предыдущих случаев поведение металла. Образец, состоявший по длине из 5 зерен, под действием напряжения в  $144 \text{ Г/мм}^2$  разорвался на 140-м часе испытания, дав удлинения 16%. На поверхности разорванного образца следов скольжения не было обнаружено даже у места разрушения. У границ зерен образовались уступы, возникшие как бы от соскальзывания зерен друг по другу вдоль границ (рис. 4). Разрыв произошел на стыке 3 зерен по их границам при очень незначительном сужении в месте разрушения. Поверхность разрушения имела блестящий камневидный характер.

Трактовка результатов. Под действием внешних сил в поликристаллическом образце возникают упругие напряжения. Из-за различия в ориентировке величина составляющей напряжения, действующей в плоскости и направлении скольжения, у разных зерен различна. Кроме того, из-за анизотропии упругих свойств кристалла, на границе зерен возникают добавочные напряжения (сложное напряженное состояние).

По достижении в наиболее благоприятно ориентированном зерне критического скальвающего напряжения в нем начинается пластическая сдвиговая деформация. Наиболее вероятным местом зарождения сдвигов являются области, прилегающие к границам зерен, в которых добавочные напряжения совпадают по знаку с извне приложенными.

Если зародившийся сдвиг встречает на пути своего распространения иначе ориентированное зерно, то он затормаживается из-за большего сопротивления распространению сдвига в этом направлении встречного зерна. Торможение сдвига приводит к росту добавочных напряжений в пограничной области. Возникающие в деформирующемся зерне добавочные напряжения по направлению обратны внешним, а во встречном зерне совпадают с ними. Вместе с ростом величины добавочных напряжений увеличивается и ширина зоны их действия, поэтому в опытах при комнатной температуре широкая прилегающая к границе зерен область оказывается менее деформированной, чем остальные участки кристалла (рис. 1).

С повышением температуры испытания критическое скальвающее напряжение сдвига падает. Это приводит к уменьшению величины добавочных напряжений в пограничной зоне, а следовательно, и к уменьшению ширины области, где деформация затруднена (рис. 2).

При достаточно высокой температуре, когда подвижность атомов делается значительной, перенапряжение, возникающее на границе зерен, частично снимается благодаря происходящим здесь локальным перемещениям отдельных атомов или групп атомов. В этом случае зона, где деформация затруднена, может отсутствовать полностью (рис. 3).

Наблюдаемое в опытах с большой скоростью растяжения (24% в час) изменение характера следов скольжения с температурой говорит о том, что с увеличением интенсивности теплового движения уменьшается протяженность отдельных областей локализации сдвиговой деформации кристалла. Не исключена возможность того, что при температурах, близких к температурам плавления, сдвиг вырождается в кристаллографи-



Рис. 1. Образец, деформированный при  $20^{\circ}$  со скоростью 24% в час;  $\times 10$

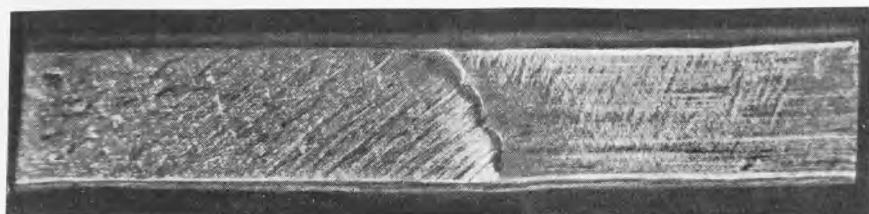


Рис. 2. Образец, деформированный при  $250^{\circ}$  со скоростью 24% в час;  $\times 10$

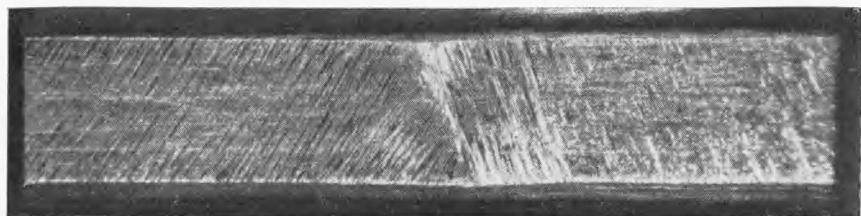


Рис. 3. Образец, деформированный при  $400^{\circ}$  со скоростью 24% в час;  $\times 10$

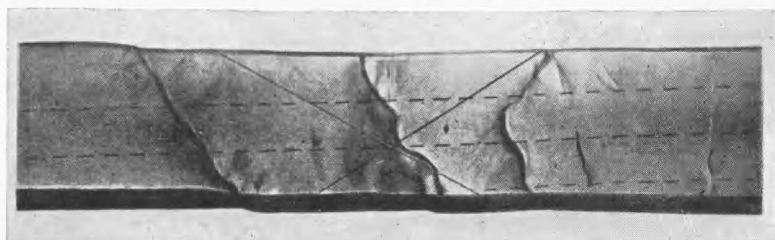


Рис. 4. Образец, разорвавшийся на 140-м часе под действием нагрузки  $144 \text{ Г/мм}^2$  при  $550\text{--}600^{\circ}$ ;  $\times 10$

чески ориентированный акт диффузионного перемещения отдельного атома или группы атомов.

Опыты по растяжению при постоянной нагрузке показали, что если температура испытания достаточно высока, а внешнее напряжение мало (меньше критического сопротивления сдвигу), то пластическая деформация протекает преимущественно диффузионным путем (следы скольжения отсутствуют) и локализуется по границам зерен.

Локализация деформации по границам зерен происходит вследствие того, что диффузионные перемещения совершаются легче всего в участках образца с повышенной свободной энергией атомов. Такими участками, в первую очередь, являются границы зерен, так как здесь правильность строения кристалла заведомо нарушена (5).

Существование градиента напряжения на границах зерен также является фактором, способствующим возникновению диффузионных потоков в пограничных зонах (6).

Случай течения металла, состоящего из зерен, охватывающих все сечение образца, был теоретически разобран Херингом (7) на основе представления о диффузионном течении металла под нагрузкой. Его исследование получило экспериментальное подтверждение в работах, проведенных на тонких проволоках золота (8) и серебра (9). Результаты наших опытов по течению алюминиевых образцов при высокой температуре также качественно подтверждают правильность его выводов.

#### В ы в о д ы

1. Роль границ зерен при пластической деформации резко меняется с изменением условий деформирования.

2. При низкой температуре и большой скорости деформирования границы зерен являются препятствием для распространения сдвиговой деформации. С повышением температуры испытания тормозящее влияние границ уменьшается.

3. При высоких температурах и низких скоростях деформирования граница является местом слабины металла и в ней происходит значительная локализация деформации.

4. Различная роль границ зерен при разных условиях деформирования обусловлена изменением механизма пластической деформации. При низкой температуре и высокой скорости деформирования процесс проходит коллективным сдвиговым механизмом; при высокой температуре и низкой скорости деформирования — путем атомно-диффузионной пластичности.

5. Характер течения алюминия в области высоких температур является косвенным доказательством существования переходного слоя на границах зерен в монокристаллах.

Поступило  
23 XII 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Д. Г. Курносов, Н. М. Тронина, М. В. Якутович, ЖТФ, 18, 2, 197 (1948); E. O. Rowan, Z. Phys., 89, 605, 614, 634 (1934); R. Becker, Physik. Z., 26, 919 (1925); G. J. Taylor, Proc. Roy. Soc., Lond., 145, 362 (1934); М. В. Якутович, Э. С. Яковлева, ЖТФ, 5, 1172 (1935). <sup>2</sup> А. В. Степанов, ЖТФ, 19, 205 (1949). <sup>3</sup> W. Boas, F. Hargreaves, Proc. Roy. Soc., A 193, № 1032, 89 (1948); B. C. Chalmers, *ibid.*, A 175, 100 (1940). <sup>4</sup> D. Hauson, M. A. Weller, J. Inst. Met., 45, 225 (1931). C. Chrussard, Metal Treatment, 14, 149 (1947); R. King, R. W. Cahn, B. Chalmers, Nature, 161, 682 (1948); Ting Sui Kê, Phys. Rev., 71, 533 (1947); 72, 41 (1947). <sup>5</sup> F. Hargreaves, R. Hills, J. Inst. Met., 41, 257 (1929). <sup>6</sup> W. S. Gorski, Sow. Phys., 8, 457 (1935); F. R. N. Nabarro, Rep. Conference of Strenght of Solids, 1948, p. 82; С. Т. Конобеевский, ЖТФ, 6, 200 (1943). <sup>7</sup> C. Herring, J. Appl. Phys., 21, 447 (1950). <sup>8</sup> B. H. Alexander, M. H. Dawson, H. P. King, *ibid.*, 22, 457 (1951). <sup>9</sup> A. P. Greenoughe, Phil. Mag., 48, 1074 (1952).