

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. И. АРХАРОВ и А. К. СЕМЕНОВА

О ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛЮМИНИЯ

(Представлено академиком И. П. Бардиным 8 XII 1951)

При изменениях температуры в твердых телах, даже не подверженных полиморфным превращениям, могут происходить структурные изменения, обусловленные пластической деформацией под действием температурных напряжений, которые возникают либо от градиента температуры по сечению тела, либо от неоднородности тела, с которой связаны различия коэффициента термического расширения.

Такая неоднородность может иметь место в поликристаллическом теле при его гетерофазности. Имеют значение также и неоднородности в межкристаллитных переходных зонах. Температурные напряжения могут вызываться также и кристаллографически обусловленной анизотропией термического расширения.

При многократных циклических изменениях температуры необратимые процессы пластической деформации, идущие под действием температурных напряжений, постепенно накапливаются и могут привести к очень заметному изменению строения тела, в частности может получиться местное разрушение тела.

Подобные явления «термической усталости» наблюдались Л. А. Гликманом ⁽¹⁾ на стали (ниже точки A_{c1}), а также Боасом и Гонейкомбом ⁽²⁾ на олове, цинке и кадмии.

Помимо отмеченных выше причин термической усталости, возможна еще одна, с более тонким механизмом возникновения температурных напряжений; эта причина связана с мозаичной структурой реальных кристаллов.

Вследствие некоторой дезориентировки соседних мозаичных блоков на их сочленениях имеются зоны, в которых расположение атомов несколько отличается от правильной кристаллической решетки; в этих зонах может иметь место внутренняя адсорбция некоторых растворенных примесей. Обе эти причины способны создать неоднородность термического расширения, аналогичную, хотя и значительно меньшую той, которая связана с межкристаллитными переходными зонами в поликристаллическом агрегате. Несмотря на малую степень неоднородности на межблочных зонах, эта неоднородность может иметь существенное значение в явлениях термической усталости, так как межблочные зоны образуют весьма развитую систему прослоек, пронизывающих каждый кристалл.

С другой стороны, различия в мозаичной структуре могут выявляться по степени термической усталости, конечно, при исключении других факторов, вызывающих ее.

Исходя из этих соображений, мы провели опыты по исследованию структурных изменений в малых монокристаллах алюминия при многократных циклических изменениях температуры.

Вследствие малого размера образцов (цилиндрики диаметром 3 мм, длиной 20 мм) и хорошей теплопроводности алюминия влияние градиента температуры сводилось практически к нулю; в данном случае также были исключены и факторы поликристалличности и анизотропии термического расширения.

Монокристаллы выращивались путем рекристаллизации алюминиевой проволоки (99,5% Al).

Циклическое изменение температуры образца осуществлялось погружением в соляную ванну (эвтектика $\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_2$) с температурой в разных сериях опытов 300, 400, 500°, с выдержкой в ней в течение 6 сек., затем переносом (в течение 2 сек.) и погружением в воду при 15°, с выдержкой в ней 6 сек., далее снова переносом (в течение 4 сек.) и погружением в соляную ванну и т. д.

Эти операции были механизированы с помощью кулачково-рычажного механизма, приводившегося в действие от электромотора. Образец приклеивался тугоплавкой замазкой к держателю и вместе с ним свободно подвешивался на конце рычага.

Структурные изменения в образцах исследовались рентгенографически, путем съемки их по Лауэ — до начала термических циклов и на разных этапах термической обработки. Каждый образец рентгенографировался при одной и той же ориентировке относительно первичного пучка и оси камеры и с сохранением одинаковых условий экспозиции.

Источником рентгеновских лучей служила трубка БСВ-Мо, работавшая при 35 кв и 12 ма. Первичный пучок вырезался диафрагмой со щелью 0,2 мм, параллельной плоскости фокусного пятна, расположенной на расстоянии 160 мм от защитного кожуха трубки, отверстие в котором (диаметром 4 мм) служило первой диафрагмой. Исследуемый монокристалл устанавливался непосредственно за щелью; его ось располагалась перпендикулярно длине щели.

Для каждого образца предварительно подбирались ориентировка, при которой можно было наблюдать отражения от плоскостей, наклоненных под достаточно большими углами к оси образца (такие отражения, при выбранных условиях съемки, дают более четкую картину деформационных изменений структуры, чем отражения от плоскостей, параллельных оси образца). Такая ориентировка фиксировалась для всех последующих рентгено съемок. Плоская кассета располагалась на расстоянии 70 мм от образца. При таких условиях экспозиция составляла 45 мин.

При максимальной температуре цикла ($t_{\text{макс}}$) 500° первые изменения в тонкой структуре пятен Лауэ заметны уже после 25 циклов. Эти изменения развиваются и усиливаются с дальнейшим увеличением числа циклов. Пятна на рентгенограммах расширяются и расщепляются на полоски, появляются ответвления от пятен в различных направлениях, не имеющих закономерной связи с направлением оси образца или с плоскостью фокусного пятна трубки. Эти ответвления также затем расщепляются. На рис. 1, а, б (см. вклейку) даны лауэграммы одного и того же образца, соответственно, в исходном состоянии и после 1100 циклов. На рис. 2, а, б приведены лауэграммы другого образца — после 1100 и после 2500 циклов.

Изменения вида пятен свидетельствуют о сложной локальной деформации монокристалла (повороты малых блоков на различные, небольшие углы и упругие изгибы блоков — в разных плоскостях и направлениях).

При меньших значениях $t_{\text{макс}}$ наблюдаются такие же изменения вида пятен на лауэграмме, но при большем числе циклов. При $t_{\text{макс}} = 300^\circ$ изменения можно заметить лишь после 2000 циклов; продолжение обработки до 8000 циклов при этих условиях дает менее сильное изменение вида пятен, чем 100—200 циклов при $t_{\text{макс}} = 500^\circ$.

Отжиг образцов в течение 2 час. при 500° после большого числа циклов (2500 при $t_{\text{макс}} = 500^\circ$ и 8000 при $t_{\text{макс}} = 300^\circ$) не вызвал заметных изменений в тонком строении пятен на лауэграмме.

Это обстоятельство, а также характер тонкой структуры пятен, возникающей после достаточно большого числа циклов термообработки, говорят о том, что изменения структуры монокристалла имеют характер полигонизации.

Развитие тонкой структуры пятен на лауэграммах происходит в разной степени у алюминиевых монокристаллов различного происхождения при одинаковых условиях обработки. На рис. 3, а, б даны лауэграммы двух разных монокристаллов, снятые после 50 циклов при $t_{\text{макс}} = 500^\circ$; первый из них был выращен за 11 час., второй — за 15 мин. Пятна на лауэграмме первого (рис. 3, а) лишь слегка размыты, у второго же (рис. 3, б) наблюдается сильное разветвление пятен.

Аналогичные различия в тонкой структуре пятен наблюдаются на рентгенограммах монокристаллов, выращенных из алюминия разной степени чистоты и подвергнутых циклической термообработке при одинаковых условиях.

Мы полагаем, что в этих случаях монокристаллы различались по степени мозаичности, и различия в термическом расширении межблочных зон и толщии блоков в разной степени сказались на развитии температурных напряжений, вызвавших деформации в микроскопических участках кристалла. Наблюдаемые нами явления «термической усталости» монокристаллов алюминия, таким образом, отражают их мозаичное строение.

Уральский государственный университет
им. А. М. Горького
Свердловск

Поступило
8 XII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Л. А. Гликман, ЖТФ, 7, 294 (1937). ² W. Boas and R. W. K. Honeycombe, Nature, 153, 494 (1944); Proc. Roy. Soc., A, 186, 57 (1946).