

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Н. Н. БУЙНОВ и Р. М. ЛЕРИНМАН

**ТОНКАЯ СТРУКТУРА ВЫДЕЛЕНИЙ В СТАРЕЮЩИХ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ**

(Представлено академиком И. П. Бардиным 28 VII 1950)

Электронно-микроскопически исследовался распад пересыщенных твердых растворов сплавов Al—Cu (4 вес. % Cu), Al—Ag (10 вес. % Ag) и Al—Mg—Si (1,4 вес. % Mg₂Si) при повышенных температурах (150—200° и выше)*.

При этих температурах в сплаве Al—Cu выделения первой фазы представляют собой пластинки, имеющие несколько ориентировок в соответствии с их образованием параллельно плоскостям куба. Линейные размеры этих пластинок и их структура зависят от температуры и времени отпуска. Так например, при температуре отпуска 180° в зависимости от времени отпуска их линейные размеры изменяются от нескольких сот ангстрем до 1 μ, а толщина от 50 до 200 Å.

Рассмотрение электронно-микроскопических снимков показывает, что пластинки имеют тонкую структуру. Они часто состоят из одного слоя частиц той же формы и размеров, что и частицы, наблюдаемые в образцах, естественно состаренных⁽¹⁾. Последнее обстоятельство, повидимому, может служить указанием на то, что действительно, как это указывает в своей работе С. Т. Конобеевский⁽²⁾, процессы, протекающие в различных температурных интервалах, могут по существу быть одинаковой природы.

При более высоких температурах отпуска этого сплава образуются более крупные пластинки. Например, отпуск при 350° приводит к появлению пластинок длиной от одного до нескольких микрон и толщиной от 50 до 400 Å. Ширина пластинок того же порядка, что и длина (см. рис. 1). На рис. 2 хорошо видны пластинки (вернее, следы пластинок), выделившиеся по двум плоскостям куба, и слабо по третьей, близкой к плоскости снимка. Пластинки, лежащие в третьей плоскости куба, отмечены стрелками. Черные контуры этих пластинок, вероятно, являются неотмытыми продуктами травления.

Эти пластинчатые выделения, так же как и пластинки, выделяющиеся при более низких температурах отпуска, имеют тонкую структуру. Они состоят из отдельных частиц, по размерам близких к частицам, характерным для естественного старения, но всегда удлиненных и более резко выявляющихся. Составляющие элементы в пластинках часто сливаются вместе, образуя сплошные слои и пластинки. В некоторых случаях удается наблюдать не только следы выделившихся частиц, но и сами частицы, вероятно, окислившиеся.

* В работе принимали участие студенты Уральского государственного университета А. Ф. Герасимов и В. В. Клюшин.

Пластинчатые выделения в сплаве Al—Ag образуются параллельно плоскостям октаэдра (см. рис. 2). Они, как и пластинчатые выделения в сплаве Al—Cu, часто имеют тонкую структуру, т. е. состоят из отдельных частиц. В сплаве Al—Ag после отпуска при 210° линейные размеры пластинок лежат в пределах от 400 Å до 1 μ, а их толщина — от величины менее 100 Å до 200 Å. При этом составляющие элементы пластинок имеют длину в пределах 100—200 Å, а иногда и до 300 Å, а поперечные размеры 50—100 Å. В некоторых случаях на снимках можно наблюдать и сами окислившиеся частицы (см. рис. 3).



Рис. 3. Сплав Al—Ag. Искусственное старение. 300°, 1 час, глубокое травление

Отпуск сплава Al—Mg—Si при 200° и выше приводит к появлению выделений в виде прутков, ориентированных параллельно осям куба. На репликах можно наблюдать как следы выделившихся частиц (см. рис. 4), так и сами окислившиеся частицы ⁽¹⁾. Пруткообразная форма выделений, возможно, связана с направленностью химической (ионной) связи в Mg₂Si (предполагается, что выделившиеся частицы являются этим соединением). Светлые штрихи на снимках, как и в сплавах Al—Cu и Al—Ag, часто имеют тонкую структуру. В таких случаях они, повидимому, являются следами не вполне сформировавшихся прутков, состоящих из удлиненных частиц. Последние в прутках располагаются или по их длине или перпендикулярно, но всегда параллельно одной оси куба.

Аналогичная картина наблюдается в сплавах Al—Cu (рис. 1) и Al—Ag (рис. 2). В пластинках первого сплава частицы ориентированы параллельно одному из направлений (100), а в пластинках второго — параллельно одному из направлений (110). Очевидно, пруткообразные и пластинчатые выделения образуются таким образом, что, независимо от их ориентировки, ориентировка составляющих их элементов остается неизменной в пределах одного кристалла. Вероятно, ориентировка составляющих пластинки и прутки элементов в этих сплавах тесно связана не только с симметрией кристалла, но и с анизотропным характером распределения искажений в кристаллической решетке.

В сплаве Al—Mg—Si, отпущенном при 200° (от 1 до 5,5 час.), длина этих частиц, составляющих пластинки, 200—300 Å, а поперечные размеры лежат в пределах от величины менее 50 Å до 100 Å. Отпуск при более высоких температурах укрупняет эти частицы, и они становятся менее удлиненными и часто сливаются вместе.

В пруткообразных выделениях новой фазы часто имеется одна, а иногда две более крупные частицы, рядом с которыми находятся более тонкие частицы той же длины (см. рис. 4). Последние по мере

удаления от более крупных уменьшаются в толщине и часто располагаются настолько близко друг к другу, что в конце концов сливаются в одну общую полосу. Весь след не вполне сформировавшегося прутка часто напоминает оптический спектр. Можно предполагать, что крупные частицы возникли в самом начале распада и своим образованием и ростом стимулировали возникновение новых частиц в направлении осей куба. Повидимому, их можно рассматривать как центры, из которых впоследствии вырастают прутки в направлении осей куба.

В прутках сплава Al—Mg—Si и в пластинках сплавов Al—Cu и Al—Ag, которые непосредственно видны на снимках, не заметно тонкой структуры. Возможно, что в них составляющие их элементы уже слились вместе, подобно тому как сливаются антифазные области в процессе упорядочения в упорядочивающихся сплавах⁽³⁾.

Процесс образования и роста новой фазы в исследованных сплавах, повидимому, можно представить себе так же, как процесс упорядочения в сплаве Au—Cu⁽⁴⁾. Зародыши упорядоченной фазы в этом сплаве имеют тетрагональную решетку и их образование представляется следующим образом.

Возникший зародыш с тетрагональной решеткой в направлении своей оси *c* ($c < a$) растягивает решетку матрицы, а в направлении осей *a* (постоянная решетки *a* упорядоченной фазы больше, чем постоянная решетки *a* неупорядоченной фазы) сжимает. В результате создаются благоприятные условия для возникновения новых зародышей упорядоченной фазы с другой ориентировкой осей *c* и *a*, так как в матрице возникли искаженные области с тетрагональной решеткой. У нового зародыша ось *c* будет направлена по направлению сжатия, а ось *a* по направлению растяжения. Новый зародыш, в свою очередь, в процессе роста также создает вокруг себя искажение решетки матрицы и этим стимулирует образование следующих.

Между зародышами упорядоченной фазы должна быть неупорядоченная область, так как две упорядоченные области с различной ориентировкой не могут совпадать кристаллографически по одной плоскости. Таким образом, в самом начале процесса упорядочения возникают разобщенные зародыши упорядоченной фазы. Возникающие зародыши новой фазы в исследованных нами сплавах на начальных стадиях распада имеют решетку, отличную от решетки матрицы, а следовательно, картину их образования, повидимому, можно представить такой же, как и картину начальной стадии упорядочения в сплаве.

Вероятно, описанная картина зарождения и роста выделений наблюдается и в других стареющих сплавах.

Группа электронной микроскопии
Института физики металлов
Уральского филиала Академии наук СССР

Поступило
26 VII 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. Н. Буйнов и Р. М. Леринман, ДАН, 74, № 4 (1950). ² С. Т. Конон-бекский, ЖЭТФ, 13, 185 (1943). ³ Я. С. Уманский, Б. Н. Финкельштейн и М. Е. Блантер, Физические основы металловедения, 1949. ⁴ Д. Нагке, Тг. А. С. М., 32, 210 (1944).