

С. З. БОКШТЕЙН, М. А. ГУБАРЕВА,  
академик С. Т. КИШКИН, Л. М. МОРОЗ

### СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА $Ni_3Al-Ni_3Nb$ В УСЛОВИЯХ ОКИСЛЕНИЯ

Эвтектические сплавы, полученные методом направленной кристаллизации, характеризуются высокой структурной стабильностью. Большую роль при этом играет совершенство структуры фазовых составляющих композиции и фазовой границы (<sup>1</sup>).

Высокая термическая стабильность структуры и жаропрочность некоторых эвтектических сплавов направленной кристаллизации, в частности систем  $Ni-Al-Nb$ , позволяет рассматривать их как перспективный материал для работы при высоких температурах, когда, как известно, весьма важную роль играет состояние поверхности сплава. Интенсивное развитие окислительных процессов может оказать существенное влияние на совершенство структуры и структурную стабильность фаз в поверхностных слоях эвтектического сплава.

В связи с этим представляло интерес исследовать влияние окисления на стабильность структуры. В качестве основных были выбраны металлографический и автордиографический методы исследования. Степень дефектности структуры оценивали по ее диффузионной проницаемости. Объектом исследования служил эвтектический сплав  $Ni_3Al-Ni_3Nb$  направленной кристаллизации, у которого время до разрушения при  $1100^\circ$  и напряжений  $14 \text{ кг/мм}^2$  составляло 198 час. Окисление исследуемых образцов сплава происходило в условиях вакуума  $5 \cdot 10^{-5}$  тор при  $900^\circ$  в течение 30 час.

Опыты проводились следующим образом. На поверхность микрошлифа наносили электролитически радиоактивный никель  $^{63}Ni$ , затем образцы подвергали диффузионному отжигу в вакуумной печи при  $900^\circ$ . При этом наряду с окислением происходило диффузионное насыщение образцов радиоактивным  $^{63}Ni$ . После отжига с поверхности последовательно удаляли слои толщиной в несколько микрон на общую глубину  $\sim 20$  мкм. Поверхность образца изучали в оптическом микроскопе и методом электронно-микроскопической автордиографии (<sup>2</sup>).

На рис. 1 приведена микроструктура сплава на разной глубине от поверхности. В исходном состоянии пластинки обеих фаз ( $\gamma'$  и  $\delta$  — более темная) имеют достаточно правильную форму (рис. 1а). После отжига и удаления с поверхности слоя  $\sim 5$  мкм можно видеть (рис. 1б) преимущественное окисление  $\delta$ -фазы ( $Ni_3Nb$ ).

Более четко эта картина видна на автордиограммах — репликах (рис. 2): одна из фаз ( $\delta$ ) покрыта слоем окислов. В тех участках, где произошло окисление, нарушается структура пластин  $\delta$ -фазы. Анализ автордиограмм показывает, что именно по  $\delta$ -фазе, в которой нарушена структура, и вблизи нее идет преимущественная диффузия никеля.

Характерно, что в отсутствие окисления диффузия никеля в эвтектическом сплаве  $Ni_3Al-Ni_3Nb$  идет преимущественно не по  $\delta$ -фазе, а по  $\gamma'$ -фазе ( $Ni_3Al$ ) (<sup>3</sup>). Очевидно, окисление делает структуру  $\delta$ -фазы дефектной и разрушает ее; кроме того, сам процесс окисления, связанный с диф-

диффузионными переходами и потоком вакансий, обуславливает более высокую диффузионную проницаемость шпонового интерметаллида.

На большей глубине  $\sim 10$  мкм (после удаления с поверхности второго слоя) можно еще видеть в отдельных участках окислы на пластинках  $\delta$ -фазы, изменение формы пластинок (границы стали зубчатыми) и их разрушение под влиянием окисления (рис. 3).

На еще большей глубине  $\sim 20$  мкм (после удаления третьего слоя) изменения наблюдаются только по границам фаз. Вдоль фазовой границы располагаются частицы окисла и в этих участках интенсивно диффундирует  $^{63}\text{Ni}$ .

Исследование процесса окисления сплавов системы  $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Ni}_3\text{Nb}$  при  $900^\circ$  в воздушной атмосфере в работе (4) показало, что в состав окислы входит ряд окислов ( $\text{NiO}$ ,  $\text{NiO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}\cdot\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ). Удельный объем окисла  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  существенно больше удельного объема металла, отношение удельных объемов составляет 2,69 (5).

Большие напряжения, возникающие при образовании окисла, могут приводить к хрупкому разрушению малопластичной  $\delta$ -фазы и нарушению межфазной границы. Как показано в работе (4), именно в этой фазе в процессе длительных испытаний на растяжение при высоких температурах образуются трещины.

Таким образом, проведенное исследование показало, что поверхностные слои эвтектического сплава  $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Ni}_3\text{Nb}$  даже в условиях вакуума  $5\cdot 10^{-5}$  тор подвергаются агрессивному воздействию кислорода, что приводит к потере стабильности и разрушению фазы  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ .

Поступило  
25 VI 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. З. Бокштейн, М. А. Губарева и др., Физ. мет. и металловед., т. 37, 3, 565 (1974).  
<sup>2</sup> С. З. Бокштейн, С. С. Гинзбург и др., ДАН, т. 179, № 6, 1309 (1968). <sup>3</sup> С. З. Бокштейн, М. А. Губарева и др., ДАН, т. 215, № 4, 829 (1974). <sup>4</sup> М. П. Арбузов, В. Г. Чуприна, Изв. высш. учебн. завед., Физика, № 1, 22 (1968). <sup>5</sup> Окисление металлов, т. 1, Теоретические основы. Под редакцией Ж. Бенара, М., 1968.

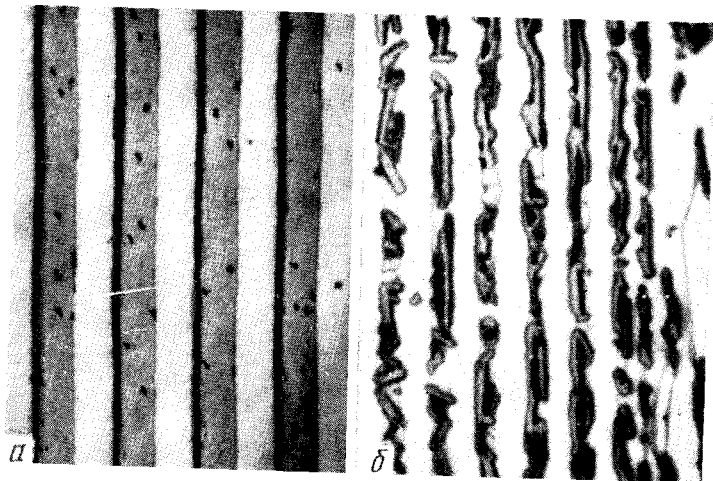


Рис. 1. *a* — исходное состояние; продольное сечение; *б* — окисление пластин  $\delta$ -фазы ( $900^\circ$ , вакуум  $5 \cdot 10^{-5}$  тор) на глубине 5 мкм от поверхности.  $1250\times$

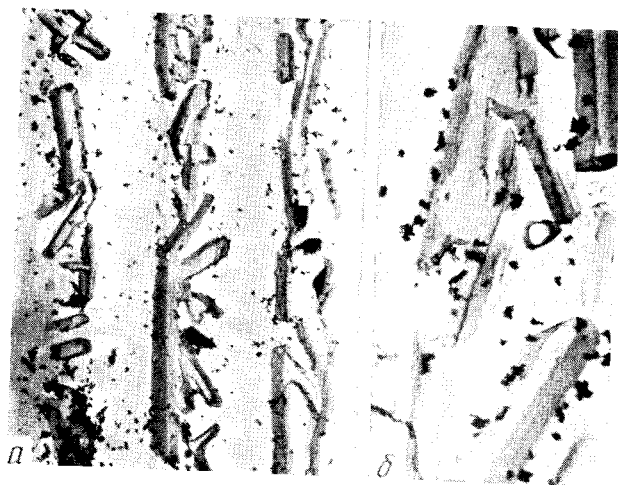


Рис. 2. Диффузия  $^{63}\text{Ni}$  ( $900^\circ$ ) в окисленном поверхностном слое (глубина 5 мкм). Авторадиограммы-реплики: *a* —  $3000\times$ , *б* —  $6000\times$



Рис. 3. Изменение формы пластин  $\delta$ -фазы под влиянием окисления (поверхностный слой, глубина 10 мкм): *a* —  $1250\times$ , *б* —  $2000\times$

В статье Я. Е. Гегузина, В. В. Калинина и Н. А. Макаровского, стр. 1319.

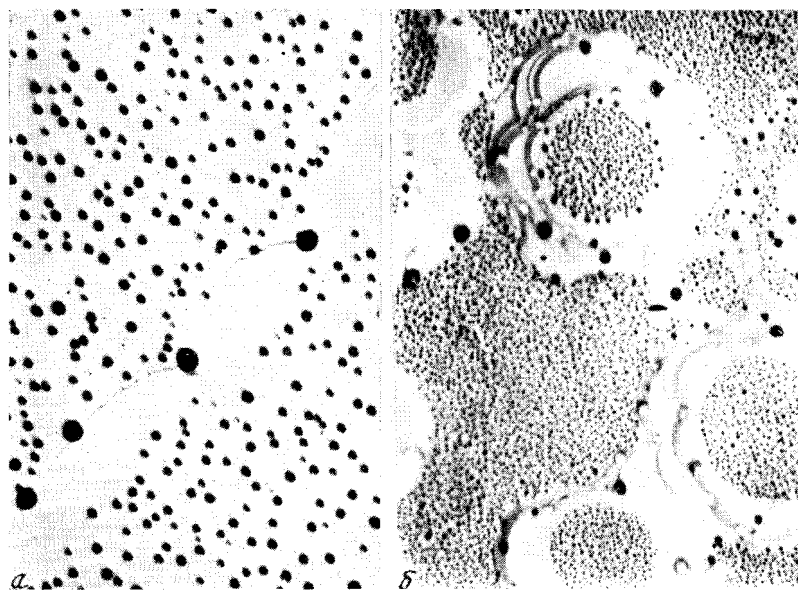


Рис. 1. Коалесценция крупивок Au на поверхности (100) монокристалла LiF в режиме «подметания» ступенями, 10 000 $\times$ . *a* – движение ступеней при испарении LiF, *б* – очаг конденсации LiF