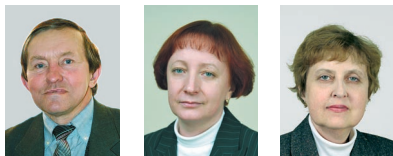


## Жаростойкие эвтектические сплавы системы Ni-Co-Cr-Al

Косицын С.В., Катаева Н.В., Косицына И.И., Литвинов В.С.



**Предложена стратегия дополнительного повышения жаростойкости интерметаллидных сплавов системы Ni-Co-Cr-Al, заключающаяся в создании максимально дисперсной двухфазной ( $\beta+\gamma$ )-структуры при переходе от обычных двухфазных ( $\beta+\gamma$ )-сплавов к эвтектическим, обладающим естественной дисперсностью и высокой термической стабильностью структуры. Экспериментально определена концентрационная область существования  $\beta/\gamma$ -эвтектики. Оценено влияние кобальта, хрома и образования сверхструктур  $A_2B$  ( $Ni_2Al$ ) и  $A_5B_3$  ( $Ni_5Al$ ) на термическую стабильность основных фазовых составляющих жаростойких эвтектических  $\beta/\gamma$ -сплавов.**

Двухфазные ( $\beta+\gamma$ )-сплавы системы Ni-Co-Cr-Al, содержащие (5-30)мас.%Cr и (5-12)мас.%Al, являются основой широко используемых напыляемых жаростойких покрытий жаропрочных никелевых сплавов. В рассматриваемых сплавах  $\beta$ -фаза (твердый раствор на основе моноалюминиды (Ni,Co)Al с решеткой B2) определяет уровень жаростойкости и жаропрочности, а  $\gamma$ -фаза (твердый раствор с решеткой A1) позволяет заметно повысить пластичность сплава.

Дополнительное повышение жаростойкости интерметаллидных сплавов системы Ni-Co-Cr-Al заключается в создании максимально дисперсной двухфазной ( $\beta+\gamma$ )-структуры и её стабилизации в широком температурно-временном интервале, что достигается переходом от обычных двухфазных ( $\beta+\gamma$ )-сплавов к эвтектическим, обладающим естественной дисперсностью и высокой термической стабильностью структуры. Впервые показано, что сплавы с эвтектической  $\beta/\gamma$ -структурой систем Ni-Cr-Al, Co-Cr-Al и Ni-Co-17мас.%Cr-Al по жаростойкости обладают заметными преимуществами перед близкими по составу, но неэвтектическими сплавами. Среди четырехкомпонентных эвтектик наиболее жаростойкими являются сплавы «никелевого» угла, содержащие до (20-25)мас.% Co.

На основе систематических исследований большого количества ( $\beta+\gamma$ )-сплавов систем Ni-Cr-Al, Co-Cr-Al и Ni-Co-Cr-Al экспериментально построены структурно-фазовые диаграммы

состояния эвтектических  $\beta/\gamma$ -композиций и определена концентрационная область существования  $\beta/\gamma$ -эвтектик в этих системах. Показано, что в системе Co-Cr-Al проекция  $\beta/\gamma$ -эвтектической линии совпадает с отрезком прямой, соединяющей вершину хромового угла с точкой двухкомпонентного эвтектического сплава. Как и в случае никелевой эвтектики, структура этих сплавов очень чувствительна к изменению состава по алюминию: уменьшение содержания алюминия на 1% переводит сплав в ряд доэвтектических, увеличение на 2% - заэвтектических. Присутствие хрома в количестве (5-20)мас.% оказывает слабое упрочняющее воздействие. При 25мас.% Cr и более в структуре появляется  $\sigma$ -фаза CoCr, что приводит к резкому упрочнению сплавов и снижению их жаростойкости. В тройных эвтектических сплавах Co-Cr-Al, содержащих (10-20)мас.% Cr, хром резко уменьшает склонность  $\beta$ -твердого раствора к микрорасслоению по кобальту и практически подавляет распад  $\beta$ -фазы. Бета-фаза в эвтектических сплавах Co-Cr-Al обладает высокой структурной и фазовой стабильностью.

Эвтектические сплавы в системе Ni-Co-17мас.%Cr-Al по жаростойкости можно разделить на три группы. Первая группа – сплавы «никелевого» угла, содержащие до (25-30)мас.%Co, являются наиболее жаростойкими (удельный привес за 200ч при 950°C не превышает 0,5мг/см<sup>2</sup>). Вторая группа – сплавы «ко-

бальтового» угла, содержащие более 50 мас.%Co, примерно в 5 раз уступают по жаростойкости сплавам первой группы. И третья группа - промежуточные по количеству кобальта сплавы (от 30 до 50 мас.%) по жаростойкости заметно уступают сплавам первой группы и с увеличением времени испытаний приближаются ко второй группе. Показано, что в четырёхкомпонентной системе Ni-Co-17мас.%Cr-Al для сохранения эвтектической структуры необходимо составы эвтектических сплавов выбирать на отрезке прямой, соединяющей в изотермическом сечении этой системы точки соответствующих тройных эвтектических сплавов Ni-Cr-Al и Co-Cr-Al.

Основные структурные составляющие эвтектических сплавов нестабильны и претерпевают структурные, фазовые и внутрифазовые превращения, обусловленные высокой энергией взаимодействия атомов никеля и алюминия, кобальта и алюминия, а также ограниченной растворимостью хрома и никеля (кобальта) в  $\beta$ -фазе, хрома и алюминия – в  $\gamma$ -фазе. Так, в тройных эвтектиках системы Ni-Cr-Al оптимальное ( $\beta+\gamma$ )-состояние устойчиво только при температуре выше 1000°C. Ниже в сплавах развивается твердофазная эвтектоидно-перитектоидная реакция  $\beta+\gamma \leftrightarrow \alpha+\gamma'$ . Кобальт является практически единственным легирующим элементом, понижающим температуру твердофазной реакции. В качестве дестабилизирующих факторов выступает распад пересыщенного  $\beta$ -твердого раствора с выделением частиц  $\alpha$ -Cr,  $\sigma$ -CoCr, частиц со сверхструктурами  $Ni_2Al$  или  $Ni_5Al_3$ , мартенситные превращения  $B2 \rightarrow L1_0$  и  $B2 \rightarrow 14M$ , а также распад  $\gamma$ -твердого раствора с выделением частиц  $\gamma'$ -фазы.

Определено влияние кобальта на термическую стабильность основных фазовых составляющих жаростойких эвтектических  $\beta/\gamma$ -сплавов системы Ni-Co-17мас.%Cr-Al. При введении более 6 мас.% кобальта подавляются эвтектоидная реакция в  $\beta$ -фазе и прерывистый распад  $\gamma$ -твердого раствора. При введении 15 и более мас.% кобальта затухает и перитектоидная реакция.

Среди исследованных эвтектических составов системы Ni-Co-Cr-Al (рис.1) оптимальному сочетанию высокой жаростойкости и хоро-

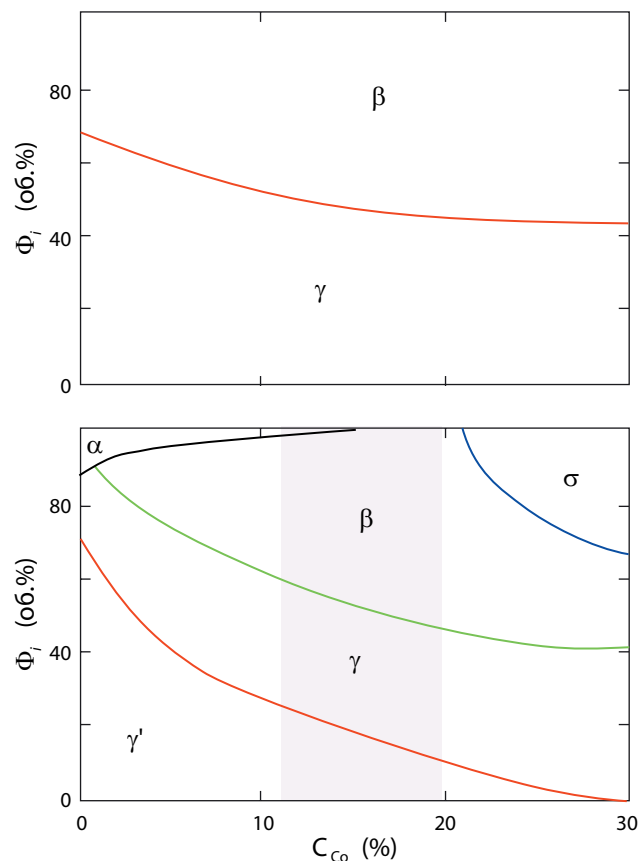


Рис.1

Диаграммы фазового состава  $\beta/\gamma$  эвтектических сплавов Ni-(0-30)%Co-17%Cr-Al при 1150(а) и 900°C(б).

шей термической структурно-фазовой стабильности соответствуют составы сплавов (в мас.%): Ni-(12-20)Co-(17-20)Cr-(9,5-10,5)Al, перспективные для использования в качестве основы напыляемых жаростойких покрытий.

Впервые показано, что при температурах ниже 700°C в пересыщенном никелем сложнелегированном  $\beta(B2)$ -твердом растворе  $\beta/\gamma$ -эвтектик системы Ni-Co-Cr-Al образуются сверхструктуры более высокого, чем исходная B2-матрица, ранга  $A_2B$  ( $Ni_2Al$ ) или  $A_5B_3$  ( $Ni_5Al_3$ ). Появление сверхструктур  $A_2B$  или  $A_5B_3$  сопровождается стабилизацией B2-матрицы по отношению к мартенситному превращению. Сверхструктура  $A_2B$  нестабильна, а стабильная фаза со сверхструктурой  $A_5B_3$  еще более хрупкая, чем исходная  $\beta(B_2)$ -фаза. Для подавления процессов выделения в жаростойких  $\beta/\gamma$ -композитах нежелательных сверхструктур высокого ранга предложено увеличение в этих эвтектиках концентрации хрома до (20-22)мас.%.