

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

И. И. КОРНИЛОВ, В. С. МИХЕЕВ и О. К. КОЕНКО-ГРАЧЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ  
СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗО—ХРОМ—АЛЮМИНИЙ. II***(Представлено академиком Н. С. Курнаковым 16 V 1939)*

Сплавы железо—хром—алюминий представляют значительный интерес в том отношении, что они при определенных соотношениях приобретают свойство высокой жаростойкости и обладают высоким удельным электро-сопротивлением. Эти два свойства, вытекающие из природы химического взаимодействия трех компонентов, являются основными свойствами для их практического применения в качестве электронагревательных материалов в печах и в других приборах электросопротивления и в качестве жаростойких материалов.

На основе литературных сведений известно, что двойная система железо—хром характеризуется непрерывным твердым раствором и образованием из твердого раствора железо—хром интерметаллического соединения  $FeCr$  (1,2). Система железо—алюминий показывает, что алюминий способен растворяться в железе в твердом состоянии до 33% (3,4), а взаимодействие алюминия с хромом, по последним литературным данным, выражается в том, что хром способен давать твердые растворы с алюминием до 17% Al (5).

Диаграммы состояния двойных систем железо—хром, железо—алюминий и хром—алюминий приводятся на сторонах равнобедренного треугольника (фиг. 1).

Литературные сведения по диаграмме состояния сплавов тройной системы железо—хром—алюминий отсутствуют.

Нами произведено исследование диаграммы состояния железной стороны системы железо—хром—алюминий в пределах Al до 40% и Cr до 100%.

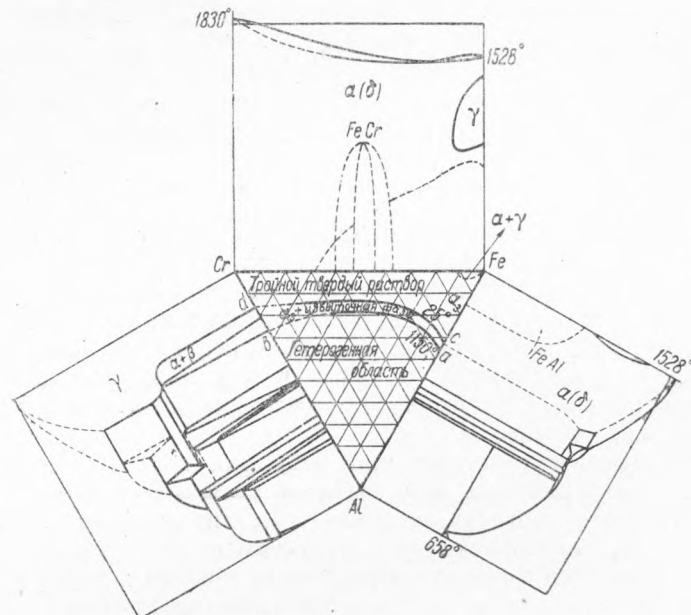
В изучении химического взаимодействия элементов и в установлении соотношения между изменением химического состава системы и ее свойств большое значение имеет наличие чистых исходных материалов и удобные пути изготовления чистых сплавов. В качестве исходных материалов нами было применено железо Армо с содержанием углерода 0.02%, в некоторых случаях электролитическое железо, но введение чистого хрома и алюминия в железо представляло значительные трудности.

Эти трудности были преодолены тем, что нам удалось разработать получение лигатурных сплавов хром—алюминий алюминотермическим способом (6) в пределах до 30% Al и эти промежуточные сплавы вводились в железо для получения соответствующих составов тройных сплавов. Изготовление сплавов железо—хром—алюминий со стороны алюминия

также производилось путем предварительно полученных лигатур железо—алюминий (примерно 50% Al).

Диаграмма состояния системы изучалась на основе следующих методов физико-химического анализа: термического анализа, микроструктуры, твердости и электропроводности.

Результаты исследования. Исходя из диаграммы состояния двойных систем, участвующих в изучаемой нами тройной системе компонентов, можно было ожидать образования тройного твердого раствора хрома и алюминия в железе  $\alpha$ -модификации. Результаты термического анализа, полученные на основе записей кривых охлаждения сплавов на пирометре акад. Н. С. Курнакова, показывают, что в железном угле тройной системы Fe—Cr—Al в значительных пределах содержания хрома



Фиг. 1

и алюминия при кристаллизации сплавов имеет место выделение тройного твердого раствора. Методом микроскопического изучения полученных сплавов, измерения твердости и электропроводности удалось установить предел распространения тройных твердых растворов в зависимости от содержания алюминия и хрома и от температуры.

Результаты изучения сплавов железо—хром—алюминий методами физико-химического анализа сведены в диаграмму состояния тройной системы, приведенную на фиг. 1.

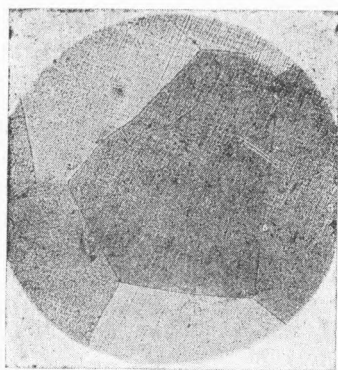
На диаграмме приводятся данные предела распространения тройного твердого раствора  $\alpha_3$  для двух состояний: первое для сплавов, закаленных с температуры  $1150^\circ$ , и второе—для сплавов, отожженных при этой температуре с последующим медленным охлаждением.

Для закаленных сплавов диаграмма равновесия характеризуется тем, что область тройного твердого раствора при температуре закалки ограничивается кривой  $ab$ , начинающейся со стороны двойной системы Fe—Al и идущей внутри треугольника выпуклостью к стороне Fe—Cr. Указанное направление кривой свидетельствует об уменьшении растворимости алюминия в железе в твердом состоянии при прибавлении хрома. Сплавы,

отожженные при приведенной выше температуре и медленно охлажденные до комнатной температуры, показывают более сложную картину, связанную не только с уменьшением совместной растворимости Al и Cr по температуре, но и с превращениями в твердом состоянии в области интерметаллических соединений  $FeCr$  и  $Fe_3Al$ .

Кривая  $Cd$  совместной растворимости Al и Cr в железе в отожженном состоянии показывает примерно аналогичную картину с кривой совместной растворимости закаленных с  $1150^\circ$  сплавов, только лишь с той разницей, что предел указанной растворимости заметно уменьшается. Иллюстрацией такого уменьшения могут служить два микроснимка, приведенные на фиг. 2 и 3.

Фиг. 2 отвечает однородной структуре закаленного с  $1150^\circ$  сплава, содержащего 20% Cr и 19% Al, а фиг. 3 отвечает тому же составу сплава



Фиг. 2



Фиг. 3

в отожженном состоянии. Как видно из фиг. 2 и 3, вместо однородной структуры в закаленном состоянии при медленном охлаждении имеет место выделение избыточной фазы в виде белых включений по границам зерна.

Область тройного твердого раствора в отожженном состоянии заметно суживается имеющими место в тройной системе превращениями, связанными с образованием в твердом состоянии двойных химических соединений  $FeCr$  и  $Fe_3Al$ . В настоящее время производится более тщательное изучение выделяемых в твердом состоянии фаз.

Результаты этих исследований будут предметом последующей статьи и поэтому указанные данные на фиг. 1 не приводятся.

На фиг. 1 приводится также область существования в тройной системе двух фаз  $\alpha + \gamma$  для изотермы  $1150^\circ$ , которая вполне определенно устанавливается методом микроструктуры и твердости.

Из учения физико-химического анализа акад. Н. С. Курнакова(?) вытекает, что в твердых растворах удельное электросопротивление вырастает по мере увеличения концентрации растворения в твердом состоянии веществ. Это положение явилось для нас руководящим началом и заранее предсказало, что чем более концентрированы твердые растворы сплавов, тем мы должны иметь большее удельное электросопротивление.

Указанные теоретические предположения в процессе исследования диаграммы состояния нашли полное подтверждение и показали, что в области тройных твердых растворов железо—хром—алюминий мы имеем сплавы

с весьма высоким удельным электросопротивлением, причем удельное электросопротивление возрастает по мере увеличения концентрации хрома и алюминия в твердом растворе.

В результате настоящего исследования установлены такие составы сплавов, которые обладают удельным электросопротивлением, большим не только нихрома, но и существующих к настоящему времени сплавов типа хромаль и фехраль. Если технический фехраль (13% Cr и 3—4% Al) имеет  $\rho = 1.1—1.2 \Omega \text{ мм}^2/\text{м}$ , а хромаль (30% Cr и 3—4% Al)  $1.20—1.40 \Omega \text{ мм}^2/\text{м}$ , то наши сплавы с более повышенным содержанием хрома и алюминия в твердом растворе обладают удельным электросопротивлением от 1.4 до 2.0, а некоторые, наиболее концентрированные, твердые растворы показывают удельное электросопротивление от 2.5 до  $3.0 \Omega \text{ мм}^2/\text{м}$ . Данные удельного электросопротивления по составу, выраженные в виде диаграммы состав—удельное электросопротивление сплавов тройной системы Fe—Cr—Al и изучение жаростойкости некоторых сплавов дали научное основание для разработки новых, рациональных составов жароупорных сплавов, которые могли бы служить заменителями нихрома, платины и др. в качестве электронагревательных элементов с различным пределом температуры их применения.

**Выводы.** 1. Исследованием сплавов тройной системы железо—хром—алюминий установлена область тройных твердых растворов  $\alpha_3$  в сплавах, закаленных с температуры  $1150^\circ$  и отожженных при этой температуре с последующим медленным охлаждением. 2. Определено превращение в твердом состоянии, связанное с изменением совместной растворимости хрома и алюминия в  $\alpha$ -железе. 3. На основе диаграммы состав—свойство разработаны новые сплавы, обладающие высокими свойствами жаростойкости и удельного электросопротивления и могущие найти практическое применение в народном хозяйстве в качестве электронагревательных материалов и жаростойких сплавов.

Институт общей и неорганической химии  
Академии Наук СССР

Поступило  
23 V 1939

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> E. C. Bain a. R. H. Aborn, National Metals Handbook 1450, 1933.  
<sup>2</sup> Н. С. Курнаков и Н. П. Коренев, Изв. сектора Ф. Х. А. 85, IX (1936). <sup>3</sup> Н. С. Курнаков, Г. Г. Уразов и А. Т. Григорьев, Изв. ин-та физ.-хим. анализа, I, вып. 1, стр. 11 (1919). <sup>4</sup> W e k e r u. M ü l l e r, Mitt. Kaiser-Wilh. Inst. Eisenforsch 11 стр. 221 (1929). <sup>5</sup> A. J. Bradley a. S. S. Lu, Journ. of Inst. of Metals № 1 стр. 319 (1937). <sup>6</sup> И. И. Корнилов и В. С. Михеев, ДАН, XX, № 9 (1938).  
<sup>7</sup> Акад. Н. С. Курнаков, Введение в физико-химический анализ (1936).