

В. В. Христенко, Б. А. Кириевский, Л. Н. Трубаченко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФАЗЕ НА ОСНОВЕ МЕДИ НА ПОЛИТЕРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛАВОВ КВАЗИБИНАРНОГО $\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$ СЕЧЕНИЯ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ Cu-Ni-Si

Установлено, что удельное электрическое сопротивление сплавов, принадлежащих квази-бинарному $\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$ сечению диаграммы состояния системы Cu-Ni-Si , линейно зависит от содержания компонентов силицида Ni_2Si в твердом растворе на основе меди.

Ключевые слова: расплав, дисперсионное твердение, распределение элементов, удельное электрическое сопротивление.

Встановлено, що питомий електричний опір сплавів, які належать квазібінарному $\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$ перерізу діаграми стану системи Cu-Ni-Si , лінійно залежить від вмісту компонентів силіциду Ni_2Si в твердому розчині на основі міді.

Ключові слова: розплав, дисперсійне твердіння, розподіл елементів, питомий електричний опір.

It is established that the electrical resistance of alloys of quasi-binary $\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$ cross section Cu-Ni-Si system diagram depends linearly on the content Ni_2Si silicide components in the copper based solid solution.

Keywords: melt, precipitation hardening, the distribution of elements, electrical resistance.

Упрочнение за счет дисперсионного твердения возможно только в сплавах тех систем, в которых повышение температуры сопровождается увеличением растворимости компонентов упрочняющих фаз в основе. Поэтому при повышении рабочих температур в дисперсионотвердеющих сплавах интенсифицируется коагуляция включений дисперсной фазы, а, следовательно, и процесс разупрочнения. Кроме того, увеличение количества элементов, растворенных в основе, существенно ухудшает показатели тепло- и электропроводностей. Поэтому при разработке новых дисперсионотвердеющих сплавов, способных сохранять при повышенных температурах приемлемые показатели кондуктивных и механических свойств, актуальной остается задача достаточно простой и эффективной оценки температурных зависимостей содержания растворенных элементов в основе. В данной работе преследовалась цель – установить на примере бронзы К1Н3 взаимосвязь между конфигурациями линии сольвус и политермой удельного электрического сопротивления сплава, упрочняемого по механизму дисперсионного твердения.

Упрочнение бронзы К1Н3, которая является сплавом системы Cu-Ni-Si , происходит в результате выделения мелкодисперсных силицидов Ni_2Si при искусственном старении полученного при закалке пересыщенного твердого раствора [1, 2]. Особенностью диаграммы состояния указанной системы является наличие квазибинарного ($\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$) – сечения при соотношении содержаний никеля и кремния около 4:1 ($\text{Ni:Si} = 4:1$) [1]. Выбор бронзы К1Н3 в качестве исследуемого сплава обоснован

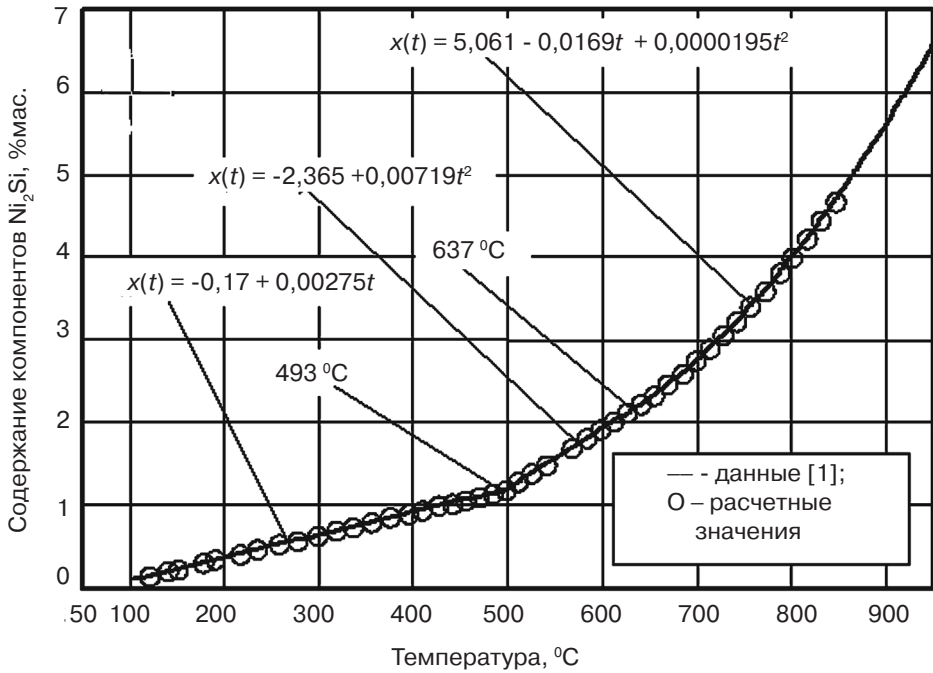
ван соответствии ее состава упомянутому соотношению. Для сплавов системы Cu-Ni-Si, составы которых принадлежат квазибинарному Cu-Ni₂Si сечению, переход в твердый раствор на основе меди одного атома кремния обязательно сопровождается переходом двух атомов никеля (и наоборот). При исследовании влияния примесей указанный факт позволяет учитывать лишь суммарное содержание никеля и кремния в твердом растворе (при рассмотрении Cu-Ni₂Si квазибинарного сечения подобный подход в [1] определяется понятием «растворимость силицида Ni₂Si в меди»). Величину удельного электрического сопротивления исследуемого сплава при различных температурах экспериментально определяли при помощи комплекта аппаратуры, описанного в работе [3].

При анализе экспериментальных данных обращает на себя внимание подобие линии сольвус квазибинарного Cu-Ni₂Si сечения [1, 2] и политермы удельного электрического сопротивления бронзы К1НЗ (рис. 1, для удобства линия сольвус квазибинарного Cu-Ni₂Si сечения представлена в координатах $c = f(t)$). При температурах от 100 до 493 °С соответствующие участки кривых хорошо аппроксимируются прямолинейными отрезками (рис. 1, таблица). Следует отметить, что величина прироста электрического сопротивления сплава при повышении температуры определяется двумя факторами: увеличением содержания в основе компонентов силицида никеля и колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. В соответствии с классической теорией электропроводности при постоянном составе величина электрического сопротивления металла (в том числе и сплава) прямо пропорциональна температуре: $R(t) = R_0(1 + \alpha t)$ [4]. Поэтому линейный характер температурной зависимости удельного электрического сопротивления объясняется совместным действием двух факторов, интенсивность влияния которых линейно зависит от температуры.

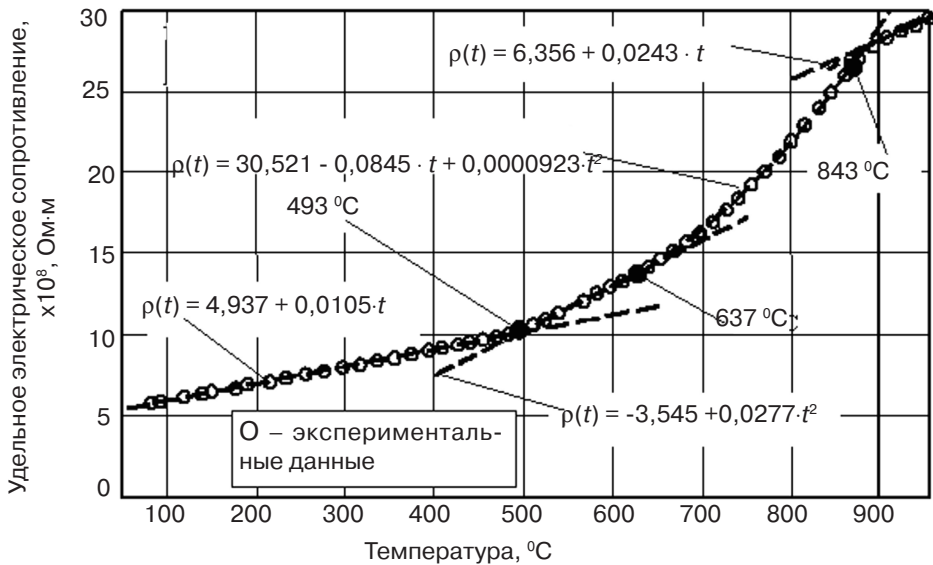
В интервале температур 493-637 °С линия сольвус квазибинарного Cu-Ni₂Si сечения диаграммы состояния системы **Cu-Ni-Si также хорошо аппроксимируется** отрезком прямой. Поэтому, в силу упомянутых причин, и на политерме удельного электрического сопротивления в указанном температурном интервале имеется прямолинейный участок (рис. 1, таблица). Однако величина углового коэффициента аппроксимирующей прямой (значение температурного коэффициента удельного сопротивления) на нем более чем в 2,6 раза превышает указанную величину для первого линейного участка политермы (таблица). Следует особо подчеркнуть, что отношение величин температурных коэффициентов сопротивления бронзы К1НЗ для второго и первого температурных диапазонов практически равно отношению угловых коэффициентов прямых, аппроксимирующих линию сольвус на втором и первом линейных участках (для политермы сопротивления указанное отношение равно 2,61, а для линии сольвус – 2,64). Данный факт косвенно указывает на то, что при прочих равных условиях величины удельных электрических сопротивлений сплавов, составы которых принадлежат квазибинарному Cu-Ni₂Si сечению, однозначно определяются температурой и содержанием элементов, растворенных в фазе на основе меди.

При температурах, превышающих примерно 640 °С, линия сольвус бинарного Cu-Ni₂Si сечения диаграммы состояния системы **Cu-Ni-Si уже существенно отклоняется** от прямой линии. Поэтому интенсивность влияния на величину электрического сопротивления сплава одного из двух ранее обозначенных факторов также нелинейно зависит от температуры. В результате на политерме удельного электрического сопротивления бронзы К1НЗ в интервале температур 637-843 °С также имеется криволинейный участок (рис. 1, таблица).

При температурах, превышающих 843 °С, в структуре бронзы К1НЗ уже отсутствует Ni₂Si фаза (никель и кремний полностью растворены в основе – рис. 1).



a



б

Рис. 1. Температурная зависимость содержания компонентов силицида Ni₂Si в фазе на основе меди (а) и политерма удельного электрического сопротивления бронзы К1Н3 (б)

Поэтому линейность температурной зависимости электрического сопротивления при температурах, превышающих 843 °С, связана с отсутствием источника насыщения указанными элементами твердого раствора на основе меди. При нагреве выше 843 °С удельное сопротивление сплава растет лишь вследствие увеличения средней амплитуды колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Действие только одного фактора, интенсивность влияния которого на значение сопротивления линейно зависит от температуры, приводит к появлению на политерме еще одного

Характеристики политерм бинарного Cu-Ni₂Si сечения диаграммы состояния системы Cu-Ni-Si

Вид температурной зависимости	Характеристики отрезков политерм							
	1-й линейный участок ток ($t < 493$ °C) $a_1 + b_1 t$		2-й линейный участок (493 °C $< t < 637$ °C) $a_2 + b_2 t$		нелинейный участок ($t > 637$ °C) $a_3 + b_3 t + c_3 t^2$			
	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	c_3	
Политерма удельного электрического сопротивления	4,94	0,0105	-3,545	0,0277	30,521	-0,085	0,0000923	
Политерма предельной растворимости компонентов силицида Ni ₂ Si в твердом растворе на основе меди	-0,17	0,00275	-2,365	0,00719	5,061	-0,017	0,0000195	

прямолинейного участка. Прекращение влияния фактора растворения проявляется и в существенном уменьшении величины температурного коэффициента удельного сопротивления (при температуре 843 °C температурный коэффициент удельного сопротивления бронзы K1H3 более чем в 2 раза меньше среднего показателя для интервала температур 637-843 °C).

Результаты приведенного анализа могут служить качественным доказательством линейности взаимосвязи электрического сопротивления бронзы K1H3 и содержания растворенных элементов в основе. Подтвердить этот вывод можно было бы по значениям коэффициента парной корреляции между указанными величинами, рассчитанными как для отдельных температурных диапазонов, так и зависимостей в целом. Однако из-за несовпадения значений температур, при которых экспериментально определялись равновесные составы фаз и величины удельного электрического сопротивления, практически осуществить указанное действие не представляется возможным. В то же время возможна не вполне строгая проверка, в ходе которой значение одной из интересующих величин (например, равновесные содержания компонентов силицида Ni₂Si в фазе на основе меди) при температурах экспериментального определения другой (например, удельного сопротивления) устанавливается по полиномам, аппроксимирующим соответствующую температурную зависимость (в данном случае – линию сольвус). Точки, соответствующие именно этим расчетным составам, на рис. 1 нанесены на линию сольвус.

Расчеты дают следующие значения коэффициента парной корреляции:

- для диапазона температур 100-493 °C
 $r_1 = 0,9996$;
- для диапазона температур 483-637 °C
 $r_2 = 0,9998$;
- для диапазона температур 637-843 °C
 $r_3 = 0,9997$;
- для всей совокупности данных (для диапазона температур 100-843 °C)
 $r_4 = 0,9994$.

Практически равенство единице всех значений коэффициента парной корреляции позволяет с высокой степенью достоверности утверждать о линейности влияния содержания элементов, растворенных в фазе на основе меди, на величину удельного электрического сопротивления

сплавов, составы которых принадлежат квазибинарному $\text{Cu-Ni}_2\text{Si}$ сечению диаграммы состояния системы Cu-Ni-Si (рис. 2). На базе полученных данных в дальнейшем возможен расчет параметров математической модели, учитывающий раздельное влияние температуры и состава фазы на основе меди на сопротивление сплавов системы Cu-Ni-Si . На данный момент можно утверждать, что такие зависимости должны быть линейными относительно как состава фазы на основе меди, так и температуры. Следует ожидать, что в рамках некоторых допущений подобная модель будет крайне полезной для оценки температурной устойчивости упрочняющих фаз более сложных сплавов, в том числе и сплавов монотектической системы $\text{Cu-(Ni-Si)-(Fe-Cr-C)}$, упрочненных двумя видами включений: образовавшихся по механизму дисперсионного твердения и сформировавшихся еще в расплаве.

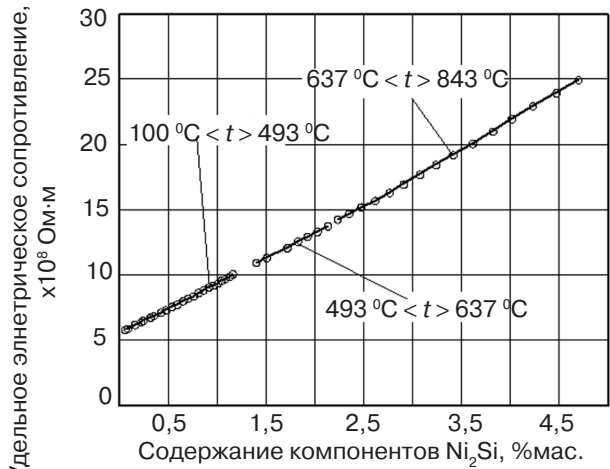


Рис. 2. Зависимость удельного электрического сопротивления бронзы К1НЗ от содержания растворенных элементов в твердом растворе на основе меди (при температурах, соответствующих линии сольвус)



Список литературы

1. Сучков Д. И. Медь и ее сплавы. – М.: Металл ургия, 1967. - 248 с.
2. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
3. Христенко В. В., Терновой С. А. Комплект лабораторного оборудования для исследования полиTERM электропроводности металлов и сплавов: Тез. докл. // 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС – прошлое, настоящее, будущее (Киев, 22-26 сентября 2008 г.). – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2008. – С. 129-131.
4. Яворский Б. М., Деллаф А. А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

Поступила 05.01.2012

Уважаемые подписчики!

Подписаться на журнал «Процессы литья»
через Интернет
можно на сайте ГП «Пресса» www.presa.ua
с помощью сервиса «Подписка On-line».
