

В. В. Христенко, Л. Г. Омелько, М. А. Руденко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОНДУКТИВНЫХ МОНОТЕКТИЧЕСКИХ Cu-(Fe-Cr-C) СПЛАВОВ

По характеристикам политерм удельного электрического сопротивления исследовано влияние состава (Fe-Cr-C) добавки на температурную устойчивость включений, выделившихся из твёрдого раствора основы при охлаждении сплавов системы Cu-(Fe-Cr-C).

Ключевые слова: медь, дисперсное упрочнение, электропроводность, политерма сопротивления.

За характеристиками політерм питомого електричного опору досліджено вплив складу (Fe-Cr-C) добавки на температурну стійкість вкрапель, які виділилися з твердого розчину основи при охолодженні сплавів системи Cu-(Fe-Cr-C).

ключові слова: мідь, дисперсне зміцнення, електропровідність, політерма електричного опору.

By the electrical resistance polyterms characteristics the effect of (Fe-Cr-C) supplements composition on temperature stability of inclusions precipitated from the solid solution basis during Cu-(Fe-Cr-C) -alloys cooling has been investigated.

Keywords: copper, dispersion strengthening, electrical conductivity, polyterm of electrical resistance.

Использование металлических систем монотектического типа позволяет получать дисперсно-упрочнённые сплавы, способные сохранять показатели служебных свойств при повышении рабочих температур вплоть до температуры плавления основы [1, 2]. На данный момент разработан ряд медных кондуктивных сплавов системы Cu-(Fe-Cr-C), упрочняющие (Fe-Cr-C) включения в которых образуются непосредственно в расплаве [2, 3]. В общем случае структура этих сплавов представляет собой матрицу (твёрдый раствор на основе меди) с распределёнными в ней включениями трёх видов (рис. 1) [4]: образовавшиеся при

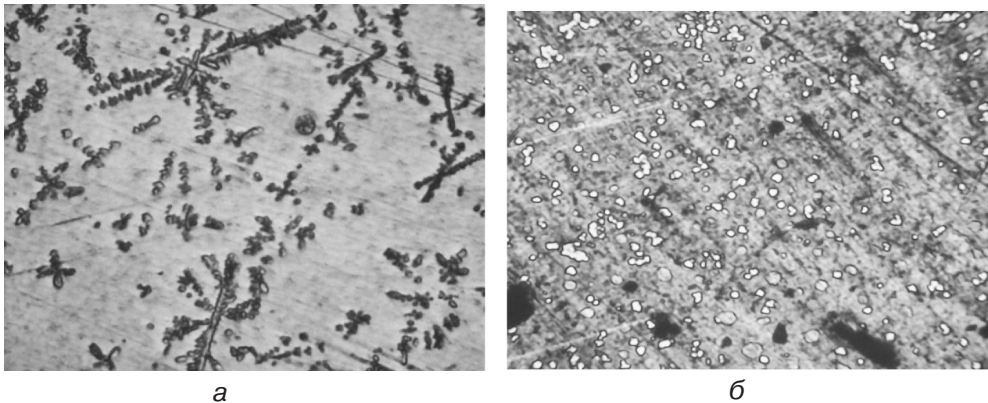


Рис. 1. Микроструктуры сплавов системы Cu-(Fe-Cr-C) а – Cu + 5 %мас. (Fe-Cr-C) добавки, содержащей 15 %мас. Cr и 0,4 C; б – Cu + 5 %мас. (Fe-Cr-C) добавки, содержащей 16 %мас Cr и 1,4 C; х500

эмульгировании расплава, вследствие ограниченной взаимной растворимости меди и компонентов (Fe-Cr-C) добавки; образовавшиеся при кристаллизации; выделившиеся из твёрдого раствора основы при охлаждении.

Установлено [4], что уровень механических свойств сплава (в том числе и при повышенных температурах) в основном определяется количеством, размерами и характером распределения включений первого вида. При повышении рабочих температур (вплоть до температуры плавления) компоненты включений первого и второго видов не растворяются в основе и поэтому практически не влияют на показатели кондуктивных свойств (например, электропроводность). Компоненты включений третьего вида при нагревании способны растворяться в основе, ухудшая электропроводность сплава. Поэтому, одним из способов увеличения электропроводности при повышенных температурах является уменьшение количества включений, выделившиеся из твёрдого раствора основы при охлаждении. Экспериментально установлено [4], что наименьшее количество таких включений образуется при вводе в расплав меди (Fe-Cr-C) добавок, фазовый состав которых в интервале кристаллизации представлен γ -твёрдым раствором на основе железа и жидкой фазой. Причём увеличение содержания углерода в добавке приводит к уменьшению количества включений третьего вида в структуре Cu-(Fe-Cr-C) сплава. В то же время установлено [4], что путём изменения состава добавки (Fe-Cr-C) полностью предотвратить образование включений, выделившихся из твёрдого раствора основы при охлаждении, не представляется возможным. Поэтому ещё одним способом улучшения показателей кондуктивных свойств сплава при повышенных температурах может быть выбор состава (Fe-Cr-C) добавки, обеспечивающего максимальную устойчивость включений третьего вида по отношению к растворению в основе при нагревании.

Влияние состава добавки (Fe-Cr-C) на термическую устойчивость таких включений по отношению к растворению в основе оценивали по температурным зависимостям удельного электрического сопротивления Cu-(Fe-Cr-C) сплавов. Исследуемые сплавы получали введением в расплав меди предварительно выплавленных (Fe-Cr-C) добавок различного состава (табл. 1). Во всех случаях количество вводимой добавки составляло 5 % от массы меди.

Политермы удельного электрического сопротивления исследованных сплавов содержат два или три прямолинейных и один криволинейный характерные участки (рис. 2). Начало третьего прямолинейного участка, наблюдаемого на температурных зависимостях удельного электрического сопротивления некоторых сплавов, можно связать с завершением заметного растворения компонентов дисперсных фаз в основе.

Устойчивость включений третьего вида (выделившихся из твёрдого раствора) к растворению в основе при нагревании количественно оценивали по значениям температур и удельных электрических сопротивлений, соответствующим краям характерных участков политерм, а также по величинам температурных коэффициентов удельного электрического сопротивления в интервалах температур, соответствующих этим участкам (табл. 2). В качестве величины температурного коэффициента удельного электрического сопротивления сплава на нелинейном участке политермы приняли его среднее значение в соответствующем диапазоне температур. При температуре 850 °С (температура конечного нагрева под закалку, принятая в [4], при оценке количества образовавшихся включений третьего вида) учитывали величину удельного электрического сопротивления сплава как дополнительную количественную характеристику.

Результаты анализа температурных зависимостей удельного электрического сопротивления (табл. 2) показывают, что наибольшая устойчивость включений третьего вида по отношению к растворению в основе имеет место в сплавах, полученных введением в расплав меди (Fe-Cr-C) добавок, фазовый состав которых в интервале кристаллизации представлен δ -твёрдым раствором на основе железа и

Таблица. 1. Химический состав и строение в интервале кристаллизации

Условное обозначение сплава	Состав упрочняющей добавки, %мас.			Фазовый состав добавки в интервале кристаллизации в области, прилегающей к температуре ликвидус [5]
	Cr	C	Fe	
Cr16-C1,4	16,0	1,4	основа	$L^* + \gamma^{**}$
Cr15-C2	15,0	2,0		$L + \gamma$
Cr20-C2	20	2,0		$L + \gamma$
Cr28-C1	27,6	1,0		$L + \delta^{***}$
Cr32-C1,5	32,2	1,5		$L + \delta$
Cr22-C3	22,0	3,0		$L + (Cr, Fe)7C_3$
Cr20-C4,4	20,0	4,4		$L + (Cr, Fe)7C_3$
Cr32-C3,5	31,7	3,5		$L + (Cr, Fe)7C_3$
Cr48-C2,3	47,5	2,31		$L + (Cr, Fe)23C_6$
Cr52-C4	51,85	4,0		$L + (Cr, Fe)7C_3$
Cr57-C5,2	57,26	5,18		$L + (Cr, Fe)7C_3$

Примечания: * L – жидкая фаза, ** твёрдый раствор на основе γ -железа; *** твёрдый раствор на основе δ -железа

жидкой фазой. Сплавы, фазовый состав упрочняющих добавок которых в интервале кристаллизации представлен γ -твёрдым раствором на основе железа и жидкой фазой, характеризуются несколько меньшей устойчивостью включений. В то же время наименьшей устойчивостью включений третьего вида по отношению к растворению

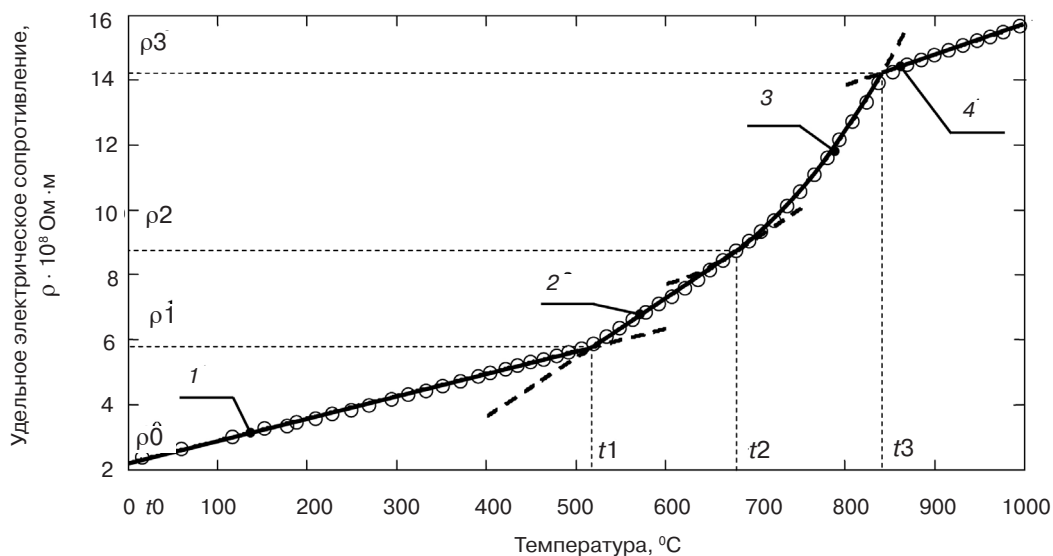


Рис. 2. Политерма удельного электрического сопротивления сплава CuCr16C1,4 (16 %мас. хрома, 1,4 углерода): 1 – первый линейный участок; 2 – второй линейный участок; 3 – нелинейный участок; 4 – третий линейный участок

Таблица 2. Параметры температурных зависимостей удельного электрического сопротивления исследованных сплавов

Условное обозначение сплавов	Характеристики политерм														
	первый линейный участок						второй линейный участок						нелинейный участок		
	удельное сопротивление при 0 °С, $\rho_0 \cdot 10^8$ Ом·м	температура конца участка, t_1 , °С	удельное сопротивление при $t_1, \rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м	температурный коэффициент сопротивления, $\alpha_1 \cdot 10^{11}$, Ом·м / °С	температура конца участка, t_2 , °С	удельное сопротивление при $t_2, \rho_2 \cdot 10^8$, Ом·м	температурный коэффициент сопротивления, $\alpha_2 \cdot 10^{11}$, Ом·м / °С	температура конца участка, t_3 , °С	удельное сопротивление при $t_3, \rho_3 \cdot 10^8$, Ом·м	средний температурный коэффициент сопротивления, $\alpha_3 \cdot 10^{11}$, Ом·м / °С	температура конца участка, t_3 , °С	удельное сопротивление при $t_3, \rho_3 \cdot 10^8$, Ом·м	удельное сопротивление при 850 °С, $\rho_{850} \cdot 10^8$, Ом·м		
Cu-Cr16-C1,4	2,202	516	5,763	6,90	668	8,578	18,52	668	32,849	840	14,228	14,695			
Cu-Cr15-C2	2,411	513	6,178	7,34	647	8,088	14,254	647	32,049	853	14,69	14,56			
Cu-Cr20-C2	2,609	516	6,882	8,28	670	9,382	16,234	670	29,914	845	14,617	14,839			
Cu-Cr27,6-C1	2,286	537	5,584	6,14	617	6,527	11,788	617	27,777	796	11,499	14,12			
Cu-Cr32-C1,5	2,636	524	6,623	7,61	645	8,673	16,942	645	35,99	852	16,123	16,026			
Cu-Cr22-C3	2,66	487	6,847	8,59	642	9,175	15,019	642	31,695	845	15,609	15,853			
Cu-Cr20-C4,4	2,462	485	6,351	8,02	606	7,911	12,893	606	34,714	802	14,715	17,419			
Cu-Cr32-C3,5	3,098	536	7,438	8,1	634	8,975	15,684	634	45,977	850	18,906	18,906			
Cu-Cr48-C2,3	4,278	592	10,246	10,08	690	12,244	20,388	690	48,578	844	19,725	20,097			
Cu-Cr52-C4	4,513	598	12,478	13,32	667	14,079	23,203	667	56,022	852	24,443	24,293			
Cu-Cr57-C5,2	4,666	494	8,803	8,38	662	11,54	16,292	662	38,184	993	24,179	17,453			

в основе отличаются сплавы, полученные с применением (Fe-Cr-C) добавок, состав которых в интервале кристаллизации представлен карбидами и жидкой фазой. Следует подчеркнуть, что для всех групп исследованных сплавов при увеличении содержания углерода и уменьшении содержания хрома в добавках, имеет место уменьшение устойчивости включений, выделившихся из твёрдого раствора основы.

Учитывая влияние состава добавки на показатели кондуктивных свойств в широком диапазоне температур (которые, в свою очередь, определяются как количеством включений третьего вида [4], так и их устойчивостью к растворению в твёрдой фазе на основе меди), а также на технологические характеристики, можно заключить, что среди исследованных Cu-(Fe-Cr-C) сплавов оптимальным можно считать сплав, полученный путём ввода (Fe-Cr-C) добавки, содержащей около 16,0 % Cr 1,4 С. Величина удельного электрического сопротивления указанного сплава при температуре 850 °С – одна из наименьших и составляет $1,47 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, при твёрдости около 63 НВ.



Список литературы

1. Христенко В. В. Перспективные методы дисперсного упрочнения сплавов на основе меди для изготовления электродов контактной сварки / В. В. Христенко, Б. А. Кириевский // Наука та інновації. 2005. – Т. 1, № 6. – С. 84-90.
2. Кириевский Б. А. Литые дисперсноупрочнённые медные сплавы на основе монотектических систем / Б. А. Кириевский, В. В. Христенко, Л. М. Трубоченко // Металлургия машиностроения. – 2008. – №4. – С. 20-24.
3. Христенко В. В. Литые электроды из сплавов системы Cu-Cr-Fe-C / В. В. Христенко // Литеній. пр-во. – 2003. – № 8. – С. 30-31.
4. Кириевский Б. А. Влияние состава упрочняющей добавки на растворимость хрома и железа в “медной” фазе монотектических расплавов Cu-(Fe-Cr-C) / Б. А. Кириевский, М. А. Руденко, В. В. Христенко // Процессы литья – 2010. – № 6. – С. 53-58.
5. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали / Ф. Ф. Химушин. – М. : Металлургиздат. – 1963. – 600 с.

Поступила 30.03.2015

**К сведению читателей
и подписчиков!
Телефон редакции
журнала "Процессы литья"
(044) 424-04-10**