

УДК 669.018.9:537.311/312:541.8

**А. М. Верховлюк, А.А. Беспалый, М. И. Науменко,  
В. В. Апухтин**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ И ЖЕЛЕЗА НА УДЕЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЛАТУНЕЙ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ**

*Представлены данные по влиянию кремния и железа на электропроводность сплавов системы Cu-Zn-Al в литом и термообработанном состояниях. Показано, что увеличение концентрации кремния от 0,02 до 0,87 % (мас. дол.) в сплаве CuZn10Al0,5 снижает электропроводность с 22,5 до 13,7 % IACS, а в сплаве CuZn24Al0,5 – с 27,4 до 17,0 % IACS. Добавка железа в сплав до 0,40 % (мас. дол.) уменьшает эту характеристику приблизительно на 27 %.*

**Ключевые слова:** электропроводность, многокомпонентные латуни, растворимость, легирование.

*Представлено результати впливу кремнію та заліза на електропровідність сплавів системи Cu-Zn-Al в литому та термообробленому станах. Показано, що зростання концентрації кремнію від 0,02 до 0,87 % (мас. дол.) у сплаві CuZn10Al0,5 зменшує електропровідність з 22,5 до 13,7 % IACS, а в сплаві CuZn24Al0,5 – з 27,4 до 17,0 % IACS. Добавка заліза в сплав до 0,40 %, (мас. дол.) знижує цю характеристику приблизно на 27 %.*

**Ключові слова:** електропровідність, багатоконпонентні латуні, розчинність, легування.

*The data of silicones and irons influence on electrical conductivity of cast and heat-treated Cu-Zn-Al – alloys are presented. It is showed that increase of Si content from 0,02 to 0,87 mass. % decreases electrical conductivity from 22,5 to 13,7 % IACS for CuZn10Al0,5 – alloy, and from 27,4 to 17,0 % IACS for CuZn24Al0,5 – alloy. Addition of 0,40 mass. % iron to alloy decreases this property on 27 %.*

**Keywords:** electrical conductivity, multicomponent brass, solubility, alloying

#### **Введение**

При разработке новых сплавов на основе меди, которые используются в электротехнической промышленности, монетном производстве и других отраслях, необходимо учитывать высокую пластичность, износостойкость, коррозионную стойкость, механические и электрические характеристики.

Медь для повышения свойств легируют различными элементами и получают сплавы, которые можно разделить на две группы [1-5]:

– материалы, у которых повышение прочностных свойств происходит за счет холодной деформации;

– дисперсно-твердеющие сплавы, свойства которых обеспечиваются за счет термической и механической обработок.

Добавки легирующих элементов, а также примеси в той или иной степени влияют на физико-механические и технологические свойства меди и сплавов на ее основе и, в первую очередь, на снижение электропроводности. Наибольшее распространение из легирующих добавок получили олово, цинк, алюминий, серебро, кадмий, кремний и др. [1, 3].

Электропроводность меди незначительно снижают малые добавки (от 0,3 до 0,8 %) серебра, кадмия, магния, хрома, циркония, теллура и селена. Эти элементы, образуя с медью ограниченные твердые растворы, повышают ее прочность и твердость. Серебро, кадмий и магний с медью дают твердые растворы со сравнительно высокой предельной концентрацией (эвтектика серебра в меди – 8,8 % (мас. дол.); кадмия – 2,7; магния – 2,8) [6]. Сплавы меди с небольшим содержанием серебра, меди и магния (до 1,0 %, мас. дол.) принадлежат к термически упрочняемым. Упрочнение происходит за счет холодной деформации.

Известно, чем больше величина растворимости элемента в меди, тем меньше коэффициент упрочнения сплава. Немаловажную роль играют и элементы, оказывающие модифицирующее действие на медь, измельчая ее зерно, что приводит к повышению прочности и твердости материала.

При выборе легирующих элементов принимают во внимание тот факт, что наибольшее влияние на сопротивляемость меди к разупрочнению при нагреве оказывают те элементы, которые мало растворяются в ней, следовательно, и несущественно влияют на электропроводность [6, 7]. Если легирующие элементы обладают большим сродством к кислороду и образуют устойчивые оксиды, то они за счет влияния этих факторов на прочность, скорость образования и воспроизводство вторичных структур также существенно изменяют электропроводность. Кроме того, физические дефекты решетки, которые возникают при затвердевании расплава, при пластической деформации и термообработке снижают удельную электропроводность. Упругие напряжения практически не оказывают влияния на эту характеристику, тогда как после пластической деформации в холодном состоянии удельная электропроводность уменьшается (приблизительно на 20 %).

### *Методика эксперимента*

Влияние добавок легирующих элементов на температуры плавления и кристаллизации сплавов на основе меди изучали с помощью высокотемпературного синхронного термического анализатора STA 449G фирмы NETSCH.

Удельную электропроводность сплавов определяли при помощи прибора «SMP-1» («Сигмаскоп» производства фирмы «X. Fischer», Германия). Точность измерения составляет  $\pm 2$  %, температура измерений –  $+ 20$  °С.

Образцы для исследований готовили в индукционной печи в атмосфере высоко-чистого аргона.

### *Обсуждение результатов*

Латуни являются самыми распространенными из тяжелых цветных сплавов. Двойные латуни служат базовым сплавом для получения многокомпонентных сплавов, которые кроме меди и цинка содержат еще один или несколько легирующих элементов Al, Ni, Fe, Mn, Sn, Si и Pb. Удельная электропроводность для большинства таких материалов находится в диапазоне 10-30 % IACS, она очень чувствительна к изменению химического состава сплавов. Например, введение кремния, марганца, железа и алюминия по разному влияет на температурные характеристики сплавов системы Cu-Zn-Sn-Al и на их электропроводность [8].

Растворимость кремния в латунях относительно невысокая и уменьшается при

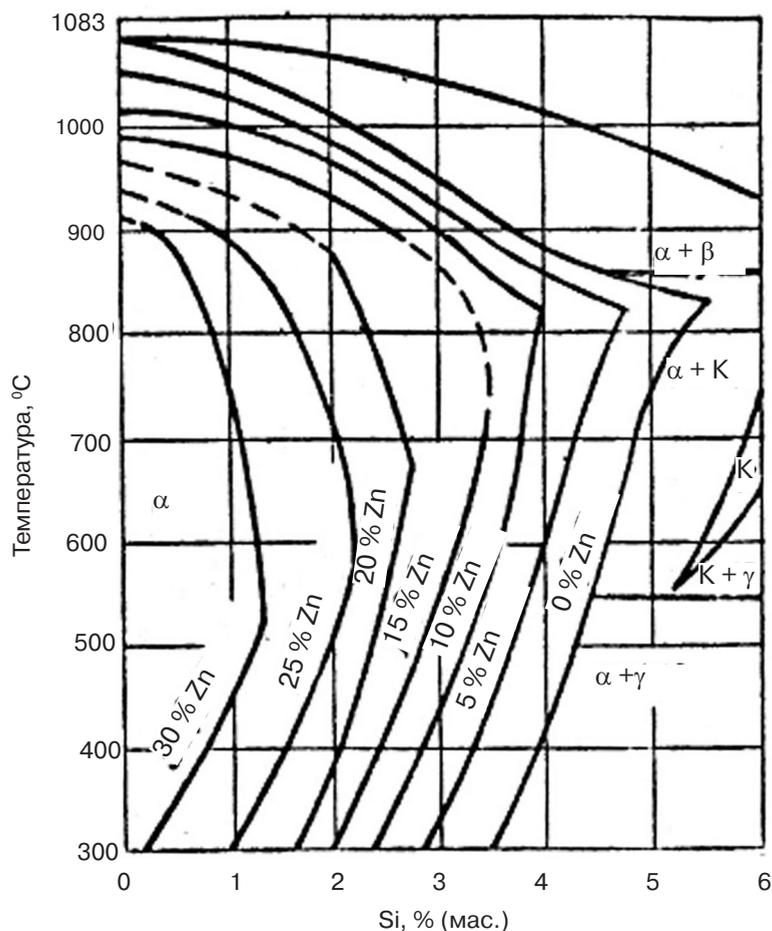


Рис. 1. Диаграмма состояния тройной системы медь-кремний-цинк

**Влияние кремния на удельную электропроводность сплавов на основе меди**

Номер образца	Химический состав, % (мас. дол.)						E, % IACS	
	Cu	Zn	Sn	Al	Si	Fe	литой	после термообработки
1	86,99	9,47	3,10	0,41	0,02	0,017	22,5	21,7
2	87,02	9,39	3,03	0,43	0,11	0,020	21,1	20,4
3	87,23	9,23	2,96	0,39	0,18	0,019	20,5	18,9
4	87,53	9,04	2,84	0,35	0,22	0,021	19,5	18,1
5	87,22	9,12	2,82	0,37	0,45	0,021	16,8	15,0
6	87,03	9,01	2,73	0,34	0,87	0,018	13,7	12,9
7	75,38	24,10	0,01	0,47	0,02	0,024	27,4	27,5
8	75,28	24,05	0,01	0,45	0,19	0,021	23,7	23,7
9	75,45	23,76	0,01	0,43	0,34	0,018	21,1	20,9
10	75,54	23,50	0,01	0,44	0,49	0,023	18,8	18,5
11	75,52	23,39	0,01	0,41	0,65	0,020	17,0	16,8

повышении содержания цинка. Максимальная растворимость кремния в  $\alpha$ -меди составляет около 3 % (мас. дол.), рис. 1. Кремний, как и все легирующие элементы (кроме никеля), уменьшает область  $\alpha$ -фазы. Литая структура представляет  $\alpha$ -твердый раствор сложного состава с включениями эвтектоида ( $\alpha+\gamma$ ). Основой эвтектоида является фаза –  $\text{Cu}_5\text{Si}$ . После деформации и отжига количество  $\gamma$ -фазы в структуре сплава уменьшается в результате частичного ее растворения в процессе отжига. Раздробленные включения  $\gamma$ -фазы ( $\text{Cu}_5\text{Si}$ ) располагаются внутри и по границам зерен  $\alpha$ -фазы. В кремнистых латунях контролируется содержание железа, которое должно быть менее 0,6 % (мас. дол.).

Кремнистые латуни, содержащие 3 % (мас. дол.) Si и до 20 % (мас. дол.) Zn имеют высокие механические, коррозионные свойства и достаточно пластичны. Латуни с большим содержанием кремния и цинка имеют низкую пластичность и не применяются для обработки давлением. Небольшие добавки кремния в пределах до 1,0 % (мас. дол.) оказывают сильное влияние на изменение удельной электропроводности латуней с различным содержанием цинка (таблица, рис. 2). Для изученных сплавов определена область концентрации кремния, которая обеспечивает регулирование удельной электропроводности в интервале от 12 до 23 % IACS.

Железо практически нерастворимо в латунях, оно выделяется из жидкой фазы в форме мелких включений  $\gamma_{\text{Fe}}$ -фазы, которые увеличивают скорость образования центров при кристаллизации и тормозят рост зерен при рекристаллизации, способствуя тем самым измельчению зерен  $\alpha$ -твердого раствора. Легирование латуней железом приводит к уменьшению размеров зерна, что способствует повышению относительного удлинения латуней [1]. В низколегированных сплавах системы Cu-Zn-Fe не зафиксировано образование тройных соединений. Кристаллизация сплавов с содержанием железа до 1,0 % (мас. дол.) проходит по принципу двойных сплавов Cu-Zn, отдельно выделяется фаза  $\gamma_{\text{Fe}}$ . Мелкие темные точки на фоне  $\alpha$ -фазы – включения железа остаются после отжига. Введение железа в исследуемые сплавы системы Cu-Zn-Sn-Al в небольшом количестве (приблизительно до 0,4 % (мас. дол.)) приводит к значительным изменениям электропроводности от 17 до 23 % IACS.

### Выводы

Таким образом, экспериментально установлено, что добавки кремния до 1,0 % (мас. дол.) и железа до 0,4 % (мас. дол.) приводят к значительным изменениям электропроводности, поэтому их можно использовать в качестве ее регуляторов. Причем железо является более предпочтительным компонентом, чем кремний, так как при кристаллизации не образует тройных соединений, измельчая зерно повышает пластичность и не вызывает осложнений при прокатке.

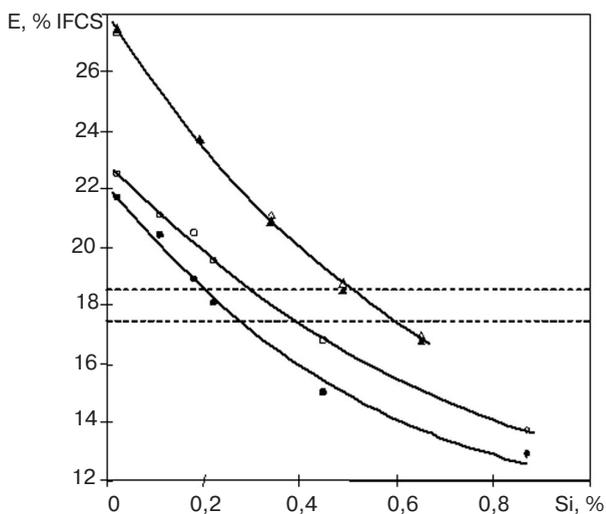


Рис. 2. Влияние кремния на удельную электропроводность сплавов:  $\Delta, \blacktriangle$  –  $\text{CuZn24Al0,5(Si)}$ ;  $\circ, \bullet$  –  $\text{CuZn10Sn3Al0,5(Si)}$ ;  $\Delta, \circ$  – в литом состоянии;  $\blacktriangle, \bullet$  – после термической обработки



## Список литературы

1. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 1956. – 559 с.
2. Сучков. Д. И. Медь и ее сплавы. – М.: Металлургия, 1967. – 248 с.
3. Журавлева Л. В. Электроматериаловедение. – М.: Изд-во «Академия», ИРПО, 2000. – 312 с.
4. Захаров М. В., Захаров А. М. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 383 с.
5. Портной К. И., Бабич Б. Н. Дисперсноупрочненные материалы. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
6. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / Под ред. Н. Х. Абрикосова. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – Том 2. – 1023 с.
8. Шуміхін В. С., Плітченко В. В., Лахненко В. Л. Фазовий склад легованих латуней у литому стані та після термообробки // Металознавство та термічна обробка металів. – 2007. – № 3. – С. 41-45.

Поступила 11.07.2012

УДК 669.245:536.421.4

**Г. Ф. Мьяница, И. И. Максютя\*, Ю. Г. Квасницкая\*,  
Е. В. Михнян\*, А. В. Нейма\***

ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект», Николаев

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ПОЛУЧЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ В ОТЛИВКАХ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ЛЕГИРОВАННОГО РЕНИЕМ**

*Проведены экспериментальные исследования, которые наряду с составом ингредиентов позволили выделить основную группу факторов, влияющих на фазово-структурные параметры ориентированной макро- и микроструктуры отливок, а именно: теплофизические свойства сплава ( $T_S$ ,  $T_L$ ) и технологические режимы процесса кристаллизации (градиент температуры  $G$  и скорость кристаллизации  $V_{кр}$ ). Проанализированы корреляционные связи между технологическими параметрами процесса кристаллизации, макро-, микроструктурой и эксплуатационными характеристиками, что дает возможность определить оптимальную композицию жаропрочного коррозионностойкого сплава для лопаток ГТУ и условия получения регулярной структуры в отливках разработанного состава.*

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав, легирующий комплекс, ориентированная структура, температурно-временные зависимости, механические характеристики.

*Проведено експериментальні дослідження, які поряд з складом інгредієнтів дозволили виділити основну групу факторів, що впливають на фазово-структурні параметри орієнтованої макро- і микроструктури виливків, а саме: теплофізичні властивості сплаву ( $T_S$ ,  $T_L$ ) і технологічні режими процесу кристалізації (градієнт температури  $G$  і швидкість кристалізації  $V_{кр}$ ).*