

## ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Cu–Cr–Si–Ce–La

О.В. Самойлова<sup>1</sup>, Е.А. Трофимов<sup>2</sup>, Н.А. Шабурова<sup>1</sup>, В.И. Гераскин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст, Россия

Изучены фазовый состав и электропроводность 12 литых образцов сплавов системы Cu–Cr–Si–Ce–La. Концентрация хрома в образцах варьировалась от 0,5 до 1,0 мас. %; концентрация кремния – от 0,1 до 1,3 мас. %; концентрации редкоземельных металлов (церия и лантана) варьировались в интервале от 0,1 до 0,5 мас. %. Образцы исследовались методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, а также методом рентгенофазового анализа. Установлено, что в экспериментальных образцах сплавов в равновесии с твердым раствором на основе меди в зависимости от концентраций легирующих элементов могут находиться интерметаллиды Cu<sub>6</sub>Ce и Cu<sub>6</sub>La, включения металлического хрома, силициды хрома Cr<sub>3</sub>Si и Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, а также силицид лантана и церия (La,Ce)Si<sub>2</sub>. В ходе работы была измерена микротвердость по Виккерсу на шлифах исследуемых образцов. По результатам проведенного исследования установлена зависимость значений показателя микротвердости *HV* от состава экспериментальных образцов. С увеличением концентрации кремния при фиксированных значениях содержания хрома, церия и лантана, показатель микротвердости растет. Также в ходе настоящей работы была измерена удельная электрическая проводимость экспериментальных образцов бесконтактным методом во вращающемся магнитном поле при температуре 20 °С. В результате чего была определена зависимость удельной электрической проводимости образцов от концентраций легирующих элементов. Данные, полученные в ходе выполнения настоящей работы, могут быть интересны для практикующих материаловедов при анализе использования добавок редкоземельных металлов в бронзы.

*Ключевые слова:* система Cu–Cr–Si–Ce–La, фазовые равновесия, электропроводность медных сплавов.

Бронзы системы Cu–Cr отличаются высокими механическими свойствами, высокой электропроводностью и теплопроводностью. Наиболее часто используются хромовые бронзы, содержащие 0,4–1,0 мас. % Cr [1, 2]. По справочным данным [1] удельная электрическая проводимость чистой меди при 20 °С составляет  $\omega = 58$  МСм/м, для хромовых бронз этот показатель при данной температуре равен  $\omega = 49$  МСм/м, что позволяет отнести хромовые бронзы к специальным медным сплавам высокой электропроводности.

Согласно фазовой диаграмме системы Cu–Cr, интерметаллиды в этой системе отсутствуют, а хром обладает ограниченной растворимостью в твердой меди (при температуре 400 °С растворимость хрома в твердой меди не превышает 0,03 мас. %) [3]. Такая картина фазовых равновесий приводит к тому, что бронзы этой системы относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам.

В то же время система Cu–Cr–Si интерес-

на с точки зрения получения дисперсионно-старееющих сплавов [4]. Изучению фазовых равновесий в системе Cu–Cr–Si посвящен ряд работ [4–8], согласно которым в исследуемой системе тройных соединений не обнаружено. По данным [5–7] в медном углу фазовой диаграммы системы Cu–Cr–Si в равновесии с твердым раствором на основе меди могут находиться хром и силицид хрома Cr<sub>3</sub>Si. Однако согласно исследованиям [4, 8] возможны области равновесия твердого раствора на основе меди и с соединением Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Данных о влиянии добавок кремния на электропроводность хромовых бронз в литературе не приводится. Известно, что кремний отрицательно влияет на проводимость чистой меди. Уже при концентрации кремния в меди 0,5 мас. % значение удельной электрической проводимости не превышает 20 МСм/м [1].

С другой стороны, в работах [9–12] установлено, что добавки редкоземельных металлов (в частности, церия и лантана) в медь

уменьшают размер зерна в ее структуре, улучшая при этом механические характеристики и практически не влияя на электропроводность металла. При этом растворимость РЗМ в меди довольно низка. В системе Cu–Ce в равновесии с твердым раствором на основе меди находится соединение  $Cu_6Ce$  [13]. Растворимость церия в твердой меди по данным работы [14] составляет всего лишь 0,2 мас. % при 870 °С и не превышает 0,05 мас. % при 300 °С. В системе Cu–La в равновесии с твердым раствором на основе меди находится соединение  $Cu_6La$ , а растворимость лантана в твердой меди по своим значениям сопоставима с растворимостью церия [15].

Следует отметить, что изучение влияния добавок церия и лантана на фазовый состав и свойства хромовых бронз и сплавов системы Cu–Cr–Si до сих пор проведено не было.

Целью настоящего исследования является изучение фазовых равновесий и электропроводности ряда сплавов системы Cu–Cr–Si–Ce–La.

Составы экспериментальных образцов приведены в таблице. Для выплавки образцов использовали электролитическую медь (чистотой 99,99 мас. %), кремний (чистотой 99,0 мас. %), электролитический хром (чистотой 99,8 мас. %), металлический церий (чистотой 99,9 мас. %), металлический лантан (чистотой 99,9 мас. %). Необходимые количества каждого из элементов шихтовали вместе, а затем сплавляли в алундовых тиглях в восстановительной атмосфере при температуре порядка 1450–1500 °С. Выдержка при данной температуре составляла порядка 15–20 мин. Тигли были закрыты графитовой крышкой. Охлаждали образцы на воздухе, не снимая крышки.

Составы экспериментальных образцов (в мас. %),  
микротвердость по Виккерсу  $HV$  (в МПа),  
удельная электрическая проводимость  $\omega$  (в МСм/м) при 20 °С,  
обнаруживаемые фазы (комплекс данных МРСА и РФА)

№ п/п	Cr	Si	Ce	La	$HV$	$\omega$	% по IACS**	Фазы
1	0,55	0,25	0,15	0,14	1030	28,45	49,05	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$
2	0,54	0,77	0,11	0,18	1120	20,31	35,02	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $(La,Ce)Si_2$
3	0,70	0,19	0,21	0,20	1030	30,35	52,33	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$
4	0,72	0,64	0,20	0,22	1230	22,43	38,67	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $(La,Ce)Si_2$
5	0,78	0,93	0,33	0,31	1320	17,33	29,88	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $(La,Ce)Si_2$
6	1,05	0,09	0,54	0,54	1440	32,57	56,16	Cu-твердый раствор, Cr, $Cr_3Si$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$
7	1,02	0,14	0,11	0,10	1410	34,92	60,21	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$
8	1,06	0,19	0,52	0,50	1490	28,65	49,40	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$
9	1,09	0,47	0,48	0,53	1650	21,55	37,16	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$
10	1,05	0,67	0,11	0,12	1610	20,48	35,31	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $(La,Ce)Si_2$
11	1,02	0,98	0,46	0,47	1810	16,80	28,97	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $Cu_6Ce$ , $Cu_6La$ , $(La,Ce)Si_2$
12	1,08	1,29	0,52	0,48	1850	13,93	24,02	Cu-твердый раствор, $Cr_3Si$ , $Cr_5Si_3$ , $(La,Ce)Si_2$

\* Cu – остальное.

\*\*  $\omega = 58$  МСм/м принимается за 100 % по IACS (International Annealed Copper Standart – международное стандартное значение).

При планировании эксперимента (в частности, при выборе температуры выплавки образцов) учитывалась ограниченная растворимость хрома в медном расплаве [3], а также расслоение металлического расплава в системах Cr–Ce и Cr–La [16].

Контроль состава образцов осуществляли посредством определения концентрации легирующих компонентов на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой OPTIMA 2100 DV (Perkin Elmer).

Структуру шлифов экспериментальных образцов исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) фирмы JEOL модификации JSM–6460LV, оснащенном спектрометром энергетической дисперсии фирмы Oxford Instruments для проведения качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА).

Рентгенофазовый анализ (РФА) на шлифах образцов проводили на многофункциональном дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker. Используемое излучение – Cu K $\alpha$ .

Измерения микротвердости по Виккерсу *HV* проводились на микротвердомере FUTURE–TECH FM–800 с программным обеспечением Thixomet PRO при нагрузке 100 г не менее чем в десяти точках на каждом из образцов.

Измерение удельного электрического сопротивления/удельной электрической проводимости было осуществлено бесконтактным методом во вращающемся магнитном поле. Подробно методика измерения и схема установки приведены в работе [17].

Фазы, обнаруживаемые в экспериментальных образцах (согласно данным МРСА и РФА), приведены в таблице. Помимо твердого раствора на основе меди, в образцах (в зависимости от концентраций легирующих элементов) могут встречаться: силициды Cr $_3$ Si, Cr $_5$ Si $_3$ , (La,Ce)Si $_2$ ; выделения частиц хрома; а также интерметаллиды Cu $_6$ Ce и Cu $_6$ La. Следует отметить, что ни в одном из образцов не были обнаружены силициды меди, которые могут образоваться согласно фазовой диаграмме системы Cu–Si [18, 19]. Однако был обнаружен принадлежащий системе La–Ce–Si силицид, который по соотношению атомных долей компонентов (согласно МРСА) можно идентифицировать как (La,Ce)Si $_2$  [20–22].

Микроструктура шлифов экспериментальных образцов согласно РЭМ приведена на рис. 1. Интерметаллиды Cu $_6$ Ce и Cu $_6$ La выде-

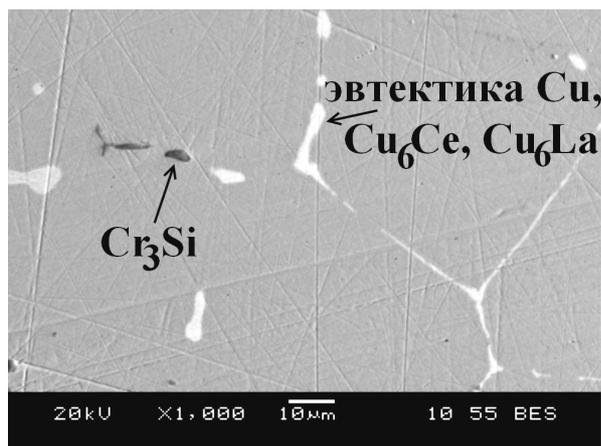
ляются по границам зерен твердого раствора на основе меди в виде эвтектики (Cu, Cu $_6$ Ce, Cu $_6$ La), что согласуется с литературными данными [13, 15]. Комплексный силицид церия и лантана выделяется отдельной фазой по границам зерен твердого раствора на основе меди. Металлический хром выделяется в виде дисперсных частиц также преимущественно по границам зерен. Силицид Cr $_3$ Si выделяется в виде отдельных ограненных частиц, что может свидетельствовать о том, что частицы данного силицида образуются не только во время кристаллизации, но и непосредственно в металлическом расплаве. Силицид Cr $_5$ Si $_3$  выделяется в виде строчечных пленочных включений. Такая идентификация силицидов хрома соответствует литературным экспериментальным данным [8].

На рис. 2 приведено распределение элементов вдоль выбранной на поверхности шлифа образца № 12 линии согласно исследованию на РЭМ и МРСА, которое наглядно показывает существование в образце № 12 помимо силицидов хрома еще и силицидов церия и лантана. На графике распределения кремния (рис. 2г) отчетливо видны шесть пиков, соответствующих высокой концентрации данного элемента; а на распределении хрома (рис. 2в) всего два пика, соответствующих по местоположению также двум пикам кремния на рис. 2г и темным ограненным включениям на рис. 2е; остальные четыре пика кремния можно соотнести со всплесками концентраций лантана и церия на рис. 2а и 2б, что соответствует светлой фазе, расположенной по границам зерен на рис. 2е.

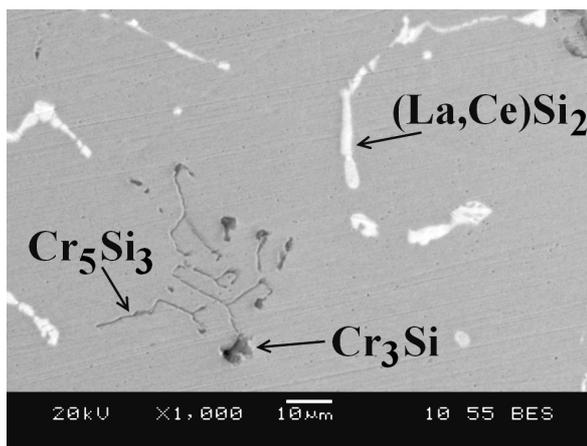
Результаты измерений микротвердости и удельной электрической проводимости также приведены в таблице.

По данным из таблицы можно установить зависимость значений показателя микротвердости *HV* от состава экспериментальных образцов. С увеличением концентрации кремния при фиксированных значениях содержания хрома, церия и лантана, показатель микротвердости растет. На рис. 3 приведена зависимость значений показателя микротвердости от содержания кремния для образцов под номерами № 6, 8, 9, 11, 12 (концентрация хрома в образцах составляет около 1 мас. %; концентрации церия и лантана – порядка 0,5 мас. % для каждого из элементов).

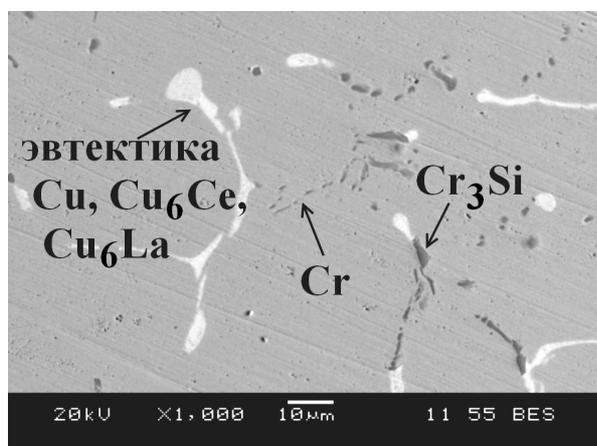
На рис. 4 приведена зависимость значений удельной электрической проводимости



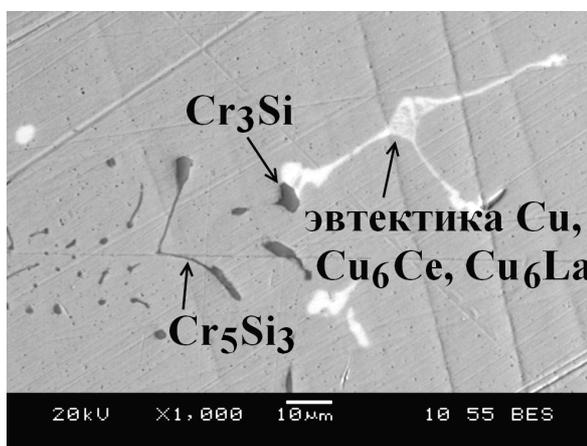
а)



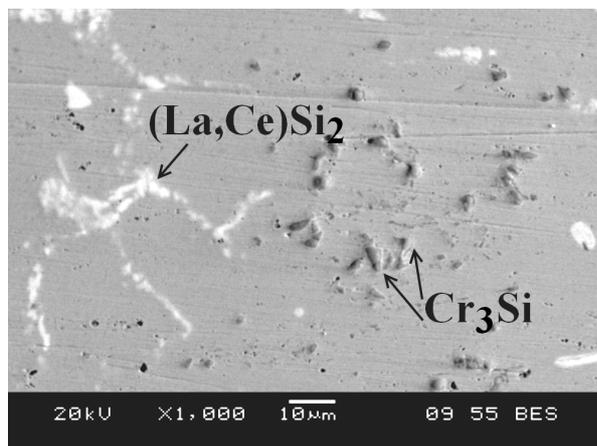
б)



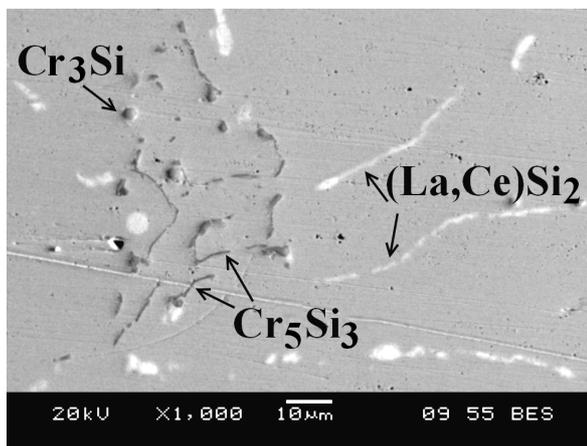
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Микроструктура согласно РЭМ шлифов экспериментальных образцов:  
а) № 1; б) № 4; в) № 6; г) № 9; д) и е) № 12

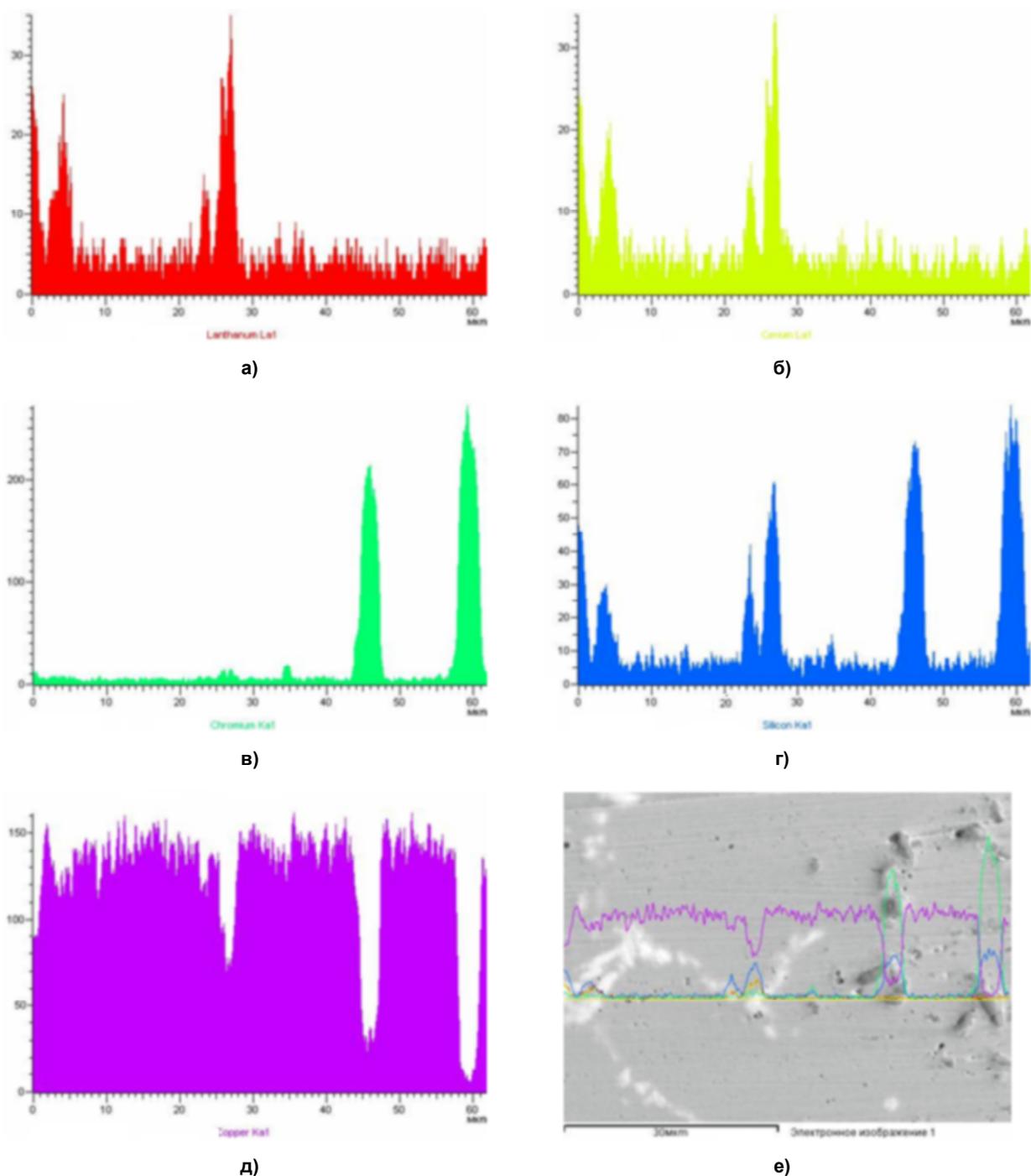


Рис. 2. Исследование образца № 12 согласно РЭМ и МРСА. Сканирование вдоль выбранной линии (при увеличении  $\times 2000$  крат): а) распределение лантана; б) распределение церия; в) распределение хрома; г) распределение кремния; д) распределение меди; е) общий вид участка образца с указанной линией сканирования

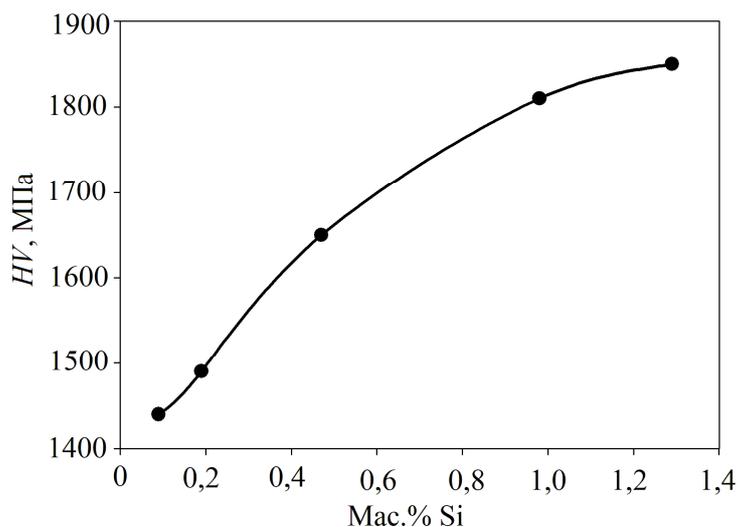


Рис. 3. Изменение микротвердости экспериментальных образцов в зависимости от концентрации кремния (для образцов с содержанием хрома ~ 1,0 мас. %, содержанием церия ~ 0,5 мас. % и содержанием лантана ~ 0,5 мас. %)

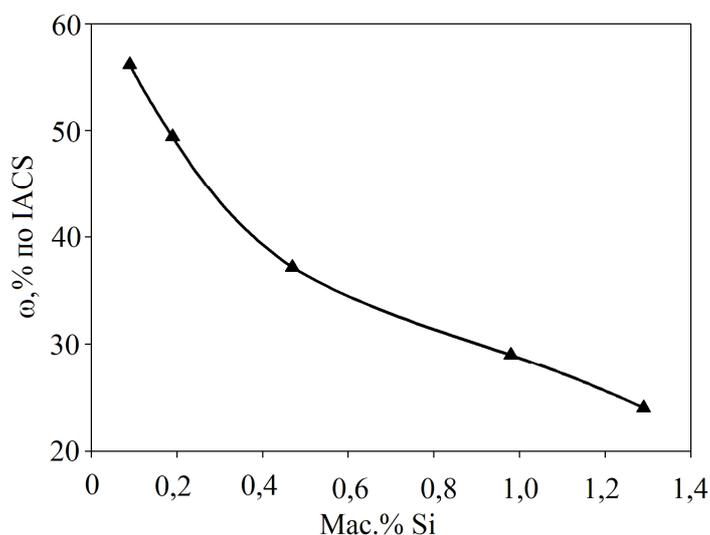


Рис. 4. Изменение удельной электрической проводимости экспериментальных образцов в зависимости от концентрации кремния (для образцов с содержанием хрома ~ 1,0 мас. %, содержанием церия ~ 0,5 мас. % и содержанием лантана ~ 0,5 мас. %)

(в % IACS) от содержания кремния также для образцов под номерами № 6, 8, 9, 11, 12. С увеличением концентрации кремния при фиксированных значениях содержания хрома, церия и лантана, значение удельной электрической проводимости падает.

Анализируя данные из таблицы, также можно сказать, что увеличение содержания церия и лантана при фиксированных концентрациях хрома и кремния практически не влияет на значения удельной электрической проводимости.

#### Выводы

Изучены фазовый состав и свойства сплавов системы Cu–Cr–Si–Ce–La. Установлено, что в образцах, начиная с концентрации кремния порядка 0,6 мас. %, образуется силицид редкоземельных металлов  $(La,Ce)Si_2$ . Образование включений металлического хрома возможно только при минимальных концентрациях кремния, не более 0,10 мас. % Si. Увеличение концентрации кремния в составе образцов увеличивает микротвердость сплавов, одновременно понижая их удельную

электрическую проводимость. В то время как увеличение концентраций церия и лантана при фиксированных концентрациях хрома и кремния практически не влияет на показатель удельной электрической проводимости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-38-60144 мол\_а\_дк.

### Литература

1. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справ. / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
2. Watanabe, Ch. Mechanical properties of Cu–Cr system alloys with and without Zr and Ag / Ch. Watanabe, R. Monzen, K. Tazaki // *Journal of Materials Science*. – 2008. – Vol. 43, no. 3. – P. 813–819. DOI: 10.1007/s10853-007-2159-8.
3. Chakrabarti, D.J. The Cr–Cu (chromium–copper) system / D.J. Chakrabarti, D.E. Laughlin // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1984. – Vol. 5, no. 1. – P. 59–68.
4. Thermodynamics and kinetics in liquid immiscible Cu–Cr–Si ternary system / Y. Yu, C. Wang, X. Liu, R. Kainuma, K. Ishida // *Materials Chemistry and Physics*. – 2011. – Vol. 127. – P. 28–39. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.11.033
5. Савицкий, Е.М. Влияние меди на строение и сверхпроводящие свойства силицидов переходных металлов / Е.М. Савицкий, Ю.В. Ефимов, Т.М. Фролова // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. – 1979. – Т. 15. – № 4. – С. 654–657.
6. Xiao, P. The wetting of silicon nitride by chromium-containing alloys / P. Xiao, B. Derby // *Journal of Materials Science*. – 1995. – Vol. 30, no. 23. – P. 5915–5922. DOI: 10.1007/BF01151505
7. Исследование диаграммы состояния сплавов Cu–Cr–Si, богатых медью / И.А. Рой, Н.Н. Федякина, Н.И. Ревина, А.К. Николаев // *Конструкционные и прецизионные сплавы цветных металлов: Тематич. сб. научн. трудов*. – М.: Металлургия, 1987. – С. 28–33.
8. Фазовые равновесия, реализующиеся в медном углу диаграммы состояния системы Cu–Cr–Si / О.В. Самойлова, Е.А. Трофимов, Г.Г. Михайлов, О.В. Зайцева // *Расплавы*. – 2015. – № 2. – С. 7–15.
9. Корольков, А.М. Малолегированные жаропрочные медные сплавы с высокой электропроводностью / А.М. Корольков, Е.В. Безус, Л.М. Гурова // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1967. – № 1. – С. 150–155.
10. Воронцова, Л.А. Влияние Р.З.М. на свойства проводниковой меди / Л.А. Воронцова, Л.П. Селезнев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1977. – № 3. – С. 41–44.
11. Effects of Ce on microstructure and mechanical properties of pure copper / Z. Zhang, G. Lin, Sh. Zhang, J. Zhou // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – Vol. 457, no. 1–2. – P. 313–318. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.056
12. Effects of small amount addition of rare earth Ce on microstructure and properties of cast pure copper / H. Li, Sh. Zhang, Y. Chen, M. Cheng, H. Song, J. Liu // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2015. – Vol. 24, no. 8. – P. 2857–2865. DOI: 10.1007/s11665-015-1595-x
13. Experimental investigation of the Ce–Cu phase diagram / H. Zhou, Ch. Tang, M. Tong, Z. Gu, Q. Yao, G. Rao // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2012. – Vol. 511, no. 1. – P. 262–267. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.09.054
14. Дуйсемалиев, У.К. Растворимость церия в меди и физико-механические свойства медноцериевых сплавов / У.К. Дуйсемалиев, А.А. Пресняков // *Известия АН СССР. Журнал неорганической химии*. – 1964. – Т. IX, № 9. – С. 2258–2259.
15. Okamoto, H. Cu–La (copper–lanthanum) / H. Okamoto // *Journal of Phase Equilibria*. – 2001. – Vol. 22, no. 5. – P. 594–595. DOI: 10.1361/105497101770332875
16. Thermodynamic assessment of Cr–rare earth systems / W. Chan, M.C. Gao, Ö.N. Doğan, P. King, A.D. Rollett // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2009. – Vol. 30, no. 6. – P. 578–586. DOI: 10.1007/s11669-009-9581-3
17. Исходные расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов / И.Г. Бродова, П.С. Попель, Н.М. Барбин, Н.А. Ватолин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 369 с.
18. Shin, D. Thermodynamic modeling of the Cu–Si system / D. Shin, J.E. Saal, Z.–K. Liu // *CALPHAD*. – 2008. – Vol. 32, no. 3. – P. 520–526. DOI: 10.1016/j.calphad.2008.05.003
19. Experimental investigation of the Cu–Si phase diagram at  $x(\text{Cu}) > 0.72$  / K. Sufryd, N. Ponweiser, P. Riani, K.W. Richter, G. Cacciamani // *Intermetallics*. – 2011. – Vol. 19, no. 10. – P. 1479–1488. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.05.017
20. Munitz, A. The Ce–Si (cerium–silicon) system / A. Munitz, A.B. Gokhale, G.J. Abbaschian // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1989. – Vol. 10. – P. 73–78.

21. Lanthanum–silicon system / M.V. Bulanova, P.N. Zheltov, K.A. Meleshevich, P.A. Saltykov, G. Effenberg, J.–C. Tedenac // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2001. – Vol. 329, no. 1-2. – P. 214–223. DOI: 10.1016/S0925-8388(01)01686-3

22. Bulanova, M.V. Lanthanum–cerium–silicon system / M.V. Bulanova, P.N. Zheltov, K.A. Meleshevich // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2002. – Vol. 347, no. 1-2. – P. 149–155. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)00772-7

**Самойлова Ольга Владимировна**, канд. хим. наук, научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; samoilovaov@susu.ru.

**Трофимов Евгений Алексеевич**, д-р хим. наук, профессор кафедры техники и технологии производства материалов, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте, г. Златоуст; trofimovea@susu.ru.

**Шабурова Наталия Александровна**, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shaburovana@susu.ru.

**Гераскин Владимир Иванович**, электроник кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; geraskinvi@susu.ru.

*Поступила в редакцию 20 апреля 2018 г.*

DOI: 10.14529/met180207

## STUDY OF THE PHASE COMPOSITION AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE Cu–Cr–Si–Ce–La SYSTEM ALLOYS

O.V. Samoylova<sup>1</sup>, samoilovaov@susu.ru,  
E.A. Trofimov<sup>2</sup>, trofimovea@susu.ru,  
N.A. Shaburova<sup>1</sup>, shaburovana@susu.ru,  
V.I. Geraskin<sup>1</sup>, geraskinvi@susu.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation

The phase composition and electrical conductivity of 12 as-cast samples of the Cu–Cr–Si–Ce–La system alloys were investigated. The concentration of chromium in the samples ranged from 0.5 to 1.0 wt. %; the concentration of silicon in samples was from 0.1 to 1.3 wt. %; the concentrations of rare-earth metals (cerium and lanthanum) ranged from 0.1 to 0.5 wt. %. The samples were studied by scanning electron microscopy and micro-X-ray spectral analysis, as well as by X-ray phase analysis. It is established that in the experimental samples in equilibrium with a solid solution based on copper, depending on the concentration of the alloying elements, intermetallics Cu<sub>6</sub>Ce and Cu<sub>6</sub>La, inclusions of metallic chromium, chromium silicides Cr<sub>3</sub>Si and Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, and also silicide of lanthanum and cerium (La,Ce)Si<sub>2</sub> were formed. In the course of the work, the Vickers microhardness was measured on the thin sections of the samples under study. The dependence of the values of the microhardness *HV* on the composition of the experimental samples was established. With increasing silicon concentration for fixed values of chromium, cerium and lanthanum, the microhardness values were increased. Also in the course of this study, the electric conductivity of the experimental samples was determined by a non-contact method in a rotating magnetic field at a temperature of 20 °C. The dependence of the electrical conductivity of the samples on the concentrations of alloying elements was determined. The data obtained in the course of this work may be of interest to engineers in the analysis of the use of rare earth metal additives in bronzes.

*Keywords: Cu–Cr–Si–Ce–La system, phase equilibria, electrical conductivity of copper alloys.*

### References

1. Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy. Otechestvennyye i zarubezhnye marki* [Copper and Copper alloys. Domestic and Foreign Brands]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 336 p.
2. Watanabe Ch., Monzen R., Tazaki K. Mechanical Properties of Cu–Cr System Alloys with and Without Zr and Ag. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43, no. 3, pp. 813–819. DOI: 10.1007/s10853-007-2159-8
3. Chakrabarti D.J., Laughlin D.E. The Cr–Cu (Chromium–Copper) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1984, vol. 5, no. 1, pp. 59–68.
4. Yu Y., Wang C., Liu X., Kainuma R., Ishida K. Thermodynamics and Kinetics in Liquid Immiscible Cu–Cr–Si Ternary System. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, vol. 127, pp. 28–39. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.11.033
5. Savitskiy E.M., Efimov Yu.V., Frolova T.M. Effect of Copper on the Structure and Superconducting Properties of Transition Metal Silicides. *Bulletin of USSR Academy of Science. Inorganic Materials*, 1979, vol. 15, no. 4, pp. 654–657. (in Russ.)
6. Xiao P., Derby B. The Wetting of Silicon Nitride by Chromium-containing Alloys. *Journal of Materials Science*, 1995, vol. 30, no. 23, pp. 5915–5922. DOI: 10.1007/BF01151505
7. Roy I.A., Fedyakina N.N., Revina N.I., Nikolaev A.K. [Investigation of the Phase Diagram of Cu–Cr–Si Alloys Rich in Copper]. *Constructional and Precision Alloys of Non-Ferrous Metals: Thematic Collection of Scientific Works*. Moscow, Metallurgy Publ., 1987. P. 28–33. (in Russ.)
8. Samoilova O.V., Trofimov E.A., Mikhailov G.G., Zaiceva O.V. Phase Equilibria Realized in the Copper-Rich Corner of the Phase Diagram of the System Cu–Cr–Si. *Melts*, 2015, no. 2, pp. 7–15. (in Russ.)
9. Korolkov A.M., Bezus E.V., Gurova L.M. Low-Alloy, High-Temperature Copper Alloys with High Electrical Conductivity. *Bulletin of USSR Academy of Science. Metals*, 1967, no. 1, pp. 150–155. (in Russ.)
10. Vorontsova L.A., Seleznev L.P. Influence of REM on the Properties of Conductor Copper. *Metal Science and Heat Treatment*, 1977, no. 3, pp. 41–44. (in Russ.)
11. Zhang Z., Lin G., Zhang Sh., Zhou J. Effects of Ce on Microstructure and Mechanical Properties of Pure Copper. *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol. 457, no. 1-2, pp. 313–318. DOI: 10.1016/j.msea.2006.12.056
12. Li H., Zhang Sh., Chen Y., Cheng M., Song H., Liu J. Effects of Small Amount Addition of Rare Earth Ce on Microstructure and Properties of Cast Pure Copper. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, vol. 24, no. 8, pp. 2857–2865. DOI: 10.1007/s11665-015-1595-x
13. Zhou H., Tang Ch., Tong M., Gu Z., Yao Q., Rao G. Experimental Investigation of the Ce–Cu Phase Diagram. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 511, no. 1, pp. 262–267. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.09.054
14. Duysemaliev U.K., Presnyakov A.A. The Solubility of Cerium in Copper and the Physical and Mechanical Properties of Copper–Cerium Alloys. *Bulletin of USSR Academy of Science. Journal of Inorganic Chemistry*, 1964, vol. 9, no. 9, pp. 2258–2259. (in Russ.)
15. Okamoto H. Cu–La (Copper–Lanthanum). *Journal of Phase Equilibria*, 2001, vol. 22, no. 5, pp. 594–595. DOI: 10.1361/105497101770332875
16. Chan W., Gao M.C., Doğan Ö.N., King P., Rollett A.D. Thermodynamic Assessment of Cr–Rare Earth Systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2009, vol. 30, no. 6, pp. 578–586. DOI: 10.1007/s11669-009-9581-3
17. Brodova I.G., Popel' P.S., Barbin N.M., Vatolin N.A. *Isxodnye rasplavy kak osnova formirovaniya struktury i svoystv alyuminiyevykh splavov* [Initial Melts as a Basis for Forming the Structure and Properties of Aluminum Alloys]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2005. 369 p.
18. Shin D., Saal J.E., Liu Z.–K. Thermodynamic Modeling of the Cu–Si System. *CALPHAD*, 2008, vol. 32, no. 3, pp. 520–526. DOI: 10.1016/j.calphad.2008.05.003
19. Sufryd K., Ponweiser N., Riani P., Richter K.W., Cacciamani G. Experimental Investigation of the Cu–Si Phase Diagram at  $x(\text{Cu}) > 0.72$ . *Intermetallics*, 2011, vol. 19, no. 10, pp. 1479–1488. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.05.017

20. Munitz A., Gokhale A.B., Abbaschian G.J. The Ce–Si (Cerium–Silicon) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1989, vol. 10, pp. 73–78.

21. Bulanova M.V., Zheltov P.N., Meleshevich K.A., Saltykov P.A., Effenberg G., Tedenac J.-C. Lanthanum–Silicon System. *Journal of Alloys and Compounds*, 2001, vol. 329, no. 1-2, pp. 214–223. DOI: 10.1016/S0925-8388(01)01686-3

22. Bulanova M.V., Zheltov P.N., Meleshevich K.A. Lanthanum–Cerium–Silicon System. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, vol. 347, no. 1-2, pp. 149–155. DOI: 10.1016/S0925-8388(02)00772-7

*Received 20 April 2018*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Изучение фазового состава и электропроводности сплавов системы Cu–Cr–Si–Ce–La / О.В. Самойлова, Е.А. Трофимов, Н.А. Шабурова, В.И. Гераскин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 54–63. DOI: 10.14529/met180207

**FOR CITATION**

Samoylova O.V., Trofimov E.A., Shaburova N.A., Geraskin V.I. Study of the Phase Composition and Electrical Conductivity of the Cu–Cr–Si–Ce–La System Alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 54–63. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180207

---