

Взаимосвязь аномалий электрических свойств цветных сплавов с диаграммами состояния

УДК 546.59, 336.742

К. Ю. Шахназаров, профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий¹, докт. техн. наук, эл. почта: Shakhnazarov_KYu@pers.spmi.ru

С. А. Вологжанина, профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий¹, докт. техн. наук, эл. почта: vologzhanina_sa@pers.spmi.ru

Р. М. Хузнахметов, аспирант кафедры материаловедения и технологии художественных изделий¹, эл. почта: s225045@stud.spmi.ru

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Учитывая важное значение для науки и практики выявления причинно-следственных механизмов аномалий свойств материалов, предложен подход, позволяющий установить взаимосвязь особенностей изменения электрических свойств с формированием наночастиц промежуточных фаз в сплавах на основе цветных металлов. Предложен критерий оценки K_{Δ} , позволяющий оценить возможность формирования наночастиц химических соединений (промежуточных фаз), которые оказывают существенное влияние на превращения в тонкой структуре. Это позволяет связать не поддающиеся объяснению экстремумы на кривых электрических свойств (электропроводности, удельного электросопротивления, электросопротивления, температурного коэффициента электросопротивления, термоэлектродвижущей силы) с диаграммами фазового равновесия промышленно используемых цветных сплавов. Появляется возможность рассмотрения диаграммы фазового равновесия с учетом разработанного критерия K_{Δ} , позволяющего дать прогноз о протекании процессов образования наночастиц промежуточных фаз и, как следствие, изменения электрических свойств в системах (Pt – Ag, Al – Fe, Bi – Pb, Al – Zr, Cu – Zn) цветных сплавов.

Разработанный критерий K_{Δ} позволяет установить: причину максимума электросопротивления и его температурного коэффициента сплавов серебра с платиной, неизменности электросопротивления в интервале концентраций (24–32 % (ат.) Fe) сплавов системы алюминий – железо, скачкообразного роста электропроводности и абсолютного максимума термоЭДС сплавов системы висмут – свинец, максимума удельного электросопротивления сплавов системы алюминий – цирконий, неизменности электропроводности и температурного коэффициента электросопротивления сплавов системы медь – цинк.

Ключевые слова: наночастицы промежуточных фаз, электропроводность, электросопротивление, температурный коэффициент электросопротивления, термоэлектродвижущая сила.

DOI: 10.17580/tsm.2024.02.06

Введение

Производство цветных сплавов занимает ведущее место по объему выпуска товарной продукции для разных отраслей и, как отмечают авторы работ [1–3], определяет экономическое развитие государства. Увеличение производства цветных металлов следует рассматривать во взаимосвязи с производством электромобилей, самолетостроением, обеспечением альтернативной энергетики. Для изделий такого назначения крайне важен учет физических свойств материалов, в частности электросопротивления.

Фазово-структурное состояние, установленное по диаграмме состояния, чаще всего согласуется с изменением свойств сплава. Благодаря этому возможно путем варьирования содержания компонентов получать заданные свойства. Основоположником выявления таких связей по праву считается академик Н. С. Курнаков (закон Курнакова, 1908 г.) [4]. Вместе с тем подробный анализ ряда промышленных сплавов не подтверждает работоспособность предложенного Н. С. Курнаковым с соавторами критерия и не дает объяснения необычного

изменения свойств, в частности электросопротивления для двойных сплавов, которые в конечном счете определяют эксплуатационные свойства изделий.

Цель работы — установить взаимосвязь аномалий электрических свойств двойных сплавов цветных металлов с формированием наночастиц промежуточных фаз с учетом их диаграмм состояния, дать объяснение природы аномалий и подтвердить достоверность полученных результатов на промышленно используемых цветных сплавах.

Методика исследования

В работе проведен системный анализ литературных данных и обсуждение результатов работ видных ученых-металловедов [4–6]. Достаточно часто высказывается предположение, что особые изменения физико-механических свойств могут быть связаны с образующимися в сплавах наночастицами промежуточных фаз, в том числе в ходе промежуточных превращений, задолго до выделения избыточных, некогерентных с матрицей обособленных фаз [7–9].

© Шахназаров К. Ю., Вологжанина С. А., Хузнахметов Р. М., 2024

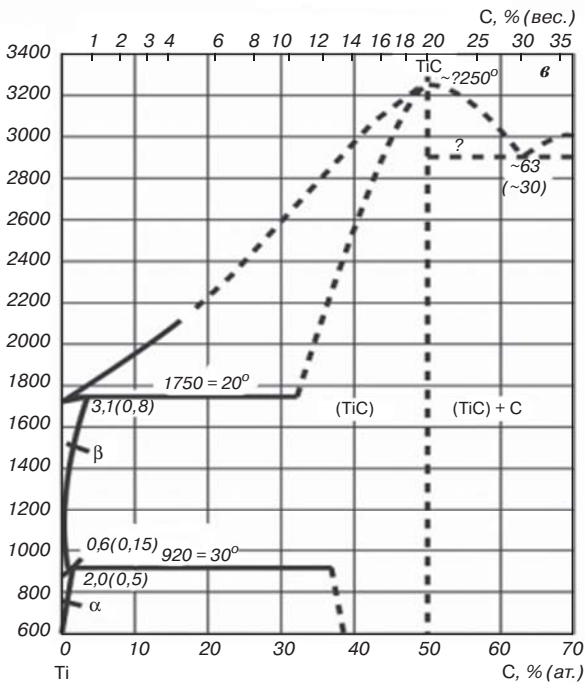
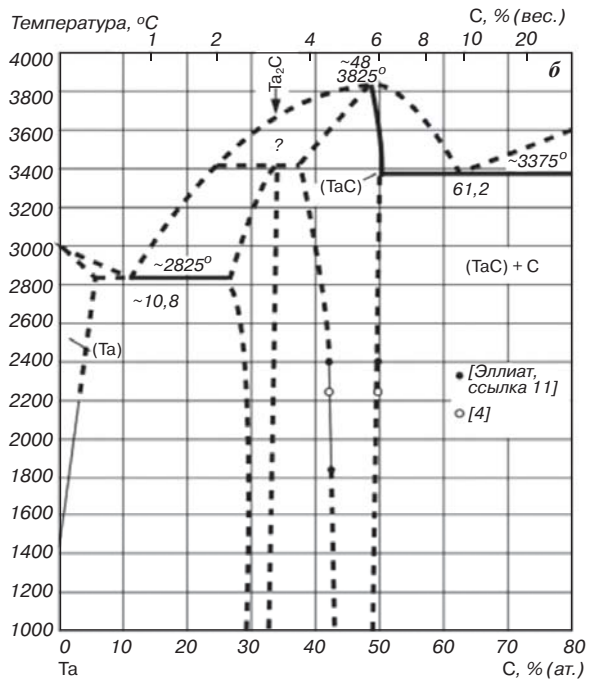
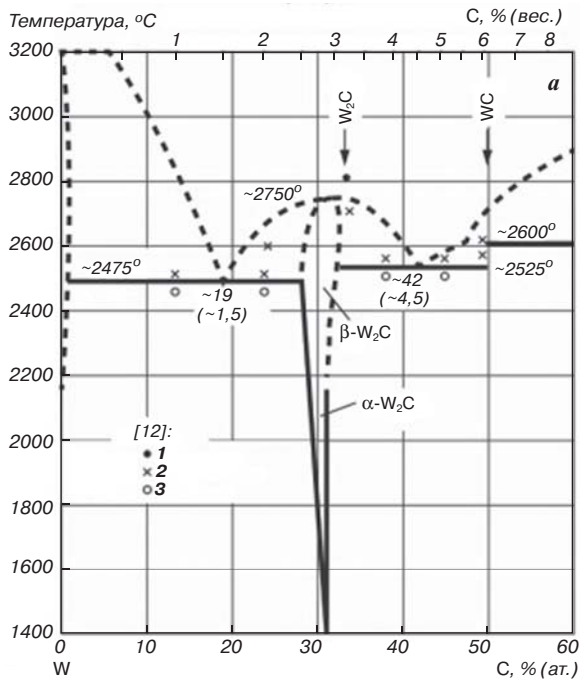


Рис. 1. Диаграммы состояния W – C (а), Та – С (б) и Тi – С (в) [4, 9, 11, 12]:
 1 – полное плавление; 2 – частичное плавление; 3 – твердое состояние

K_{Δ} характерен для эвтектических точек, на концах эвтектических или перитектических горизонталей, на изгибе ликвидуса или солидуса, в случае когда наблюдается монотонное изменение отвечающих им солидуса или ликвидуса.

Для пояснения возможного использования критерия K_{Δ} рассмотрим в качестве примера безусловное наличие наночастиц промежуточных фаз размером 5–40 нм (химических соединений постоянного состава) в твердых сплавах — карбидов вольфрама (рис. 1, а), карбидов тантала (см. рис. 1, б) и карбидов титана (см. рис. 1, в) [10–12].

В соответствии с диаграммой состояния [9], карбид вольфрама (см. рис. 1, а) представляет собой образующуюся по перитектической реакции инконгруэнтно плавящуюся фазу, которой соответствует изменение интервала кристаллизации (K_{Δ}).

Кристаллическая структура карбида ТаС формируется в соответствии с K_{Δ} (см. рис. 1, б) в области максимального интервала кристаллизации в конце эвтектической горизонтали при температуре 3375 °С и 50 % (ат.) С [9].

В свою очередь, TiC образуется в соответствии с K_{Δ} при нулевом интервале кристаллизации в точке дистектики, соответствующей температуре 3250 °С и концентрации углерода 50 % (ат.) (см. рис. 1, в) [9].

Таким образом, все три вида наночастиц карбидов отвечают K_{Δ} , но эти качественные изменения интервала кристаллизации имеют три разные упомянутые причины. Использование полученных наночастиц

Основанием формирования фаз в сплавах являются:
 – максимумы/минимумы либо изгибы линий диаграммы («Н. С. Курнаков подчеркивал, что не состав характеризует определенное химическое соединение, ... а состав, отвечающий сингулярной точке на кривой различных свойств» [4]);

– критерий K_{Δ} , учитывающий качественные изменения зон кристаллизации либо перекристаллизации и являющийся характерным признаком процесса образования наночастиц химических соединений через последовательные этапы формирования кластеров — предвыделений — выделений промежуточных фаз [8, 9].

карбидов для модифицирования твердых сплавов позволяет обеспечить повышение уровня физико-механических свойств примерно в 1,5 раза [10, 13, 14].

Сплавы системы Pt – Ag

«Первые литературные данные о системе серебро – платина относятся к 1867 г.» [4]. Томпсон и Миллер в 1906 г., Деринкель в 1907 г., а также Н. С. Курнаков совместно с Н. А. Немиловым продолжили исследования этой системы, обратив внимание на аномальное изменение электросопротивления сплава, содержащего ~45 % Ag, — наличие максимума, не характерного для сплавов-смесей [4, 15, 16].

О. А. Новиковой [17] в 1957 г. были проведены комплексные исследования свойств сплавов системы Pt – Ag после разных режимов термообработки (рис. 2).

Анализ этих результатов позволяет установить максимальное значение электросопротивления при

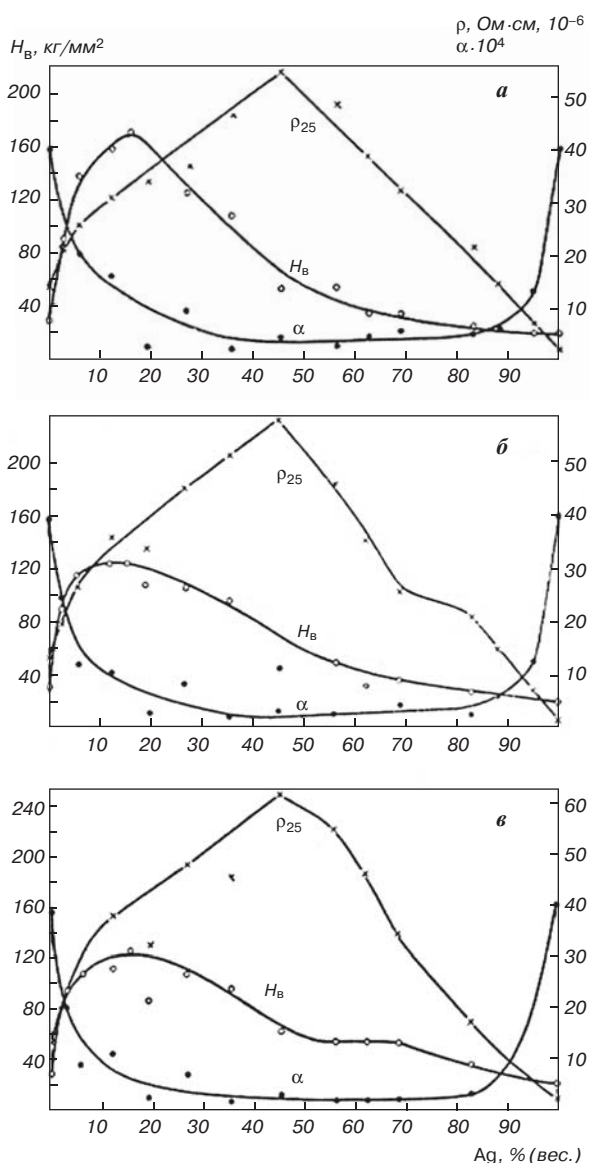


Рис. 2. Свойства сплавов серебра с платиной в зависимости от режима термической обработки: отожженных (а), закаленных при 600 °С (б) и закаленных при 900 °С (в) [17]

содержании ~45 % Ag независимо от того, какую термическую обработку проводили — отжиг или закалку, и какую структуру в результате обработки будет иметь сплав.

Обратимся к диаграмме Pt – Ag (рис. 3). Сплав с ~45 % Ag отвечает концу перитектической горизонтали [18], где использование K_{Δ} позволяет объяснить (с учетом результатов работ авторов [19, 20]) возможность образования наночастиц Ag/Pt.

Сплавы системы Al – Fe

В соответствии с правилом Н. С. Курнакова, твердость связана с электропроводностью. При содержании ~24–32 % (ат.) Al выявлены площадки на кривых электропроводности (рис. 4, а) [4]. В этом интервале установлены 4 вида наночастиц Fe_2Al_7 , $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , $FeAl_2$ протяженностью 1–10 нм и толщиной 0,5–1,0 нм, более или менее равномерно распределенных в матрице [21–23]. Все обнаруженные наночастицы имеют разную кристаллическую решетку: моноклинную — соединение Fe_2Al_5 [24, 25]; ромбоэдрическую — $FeAl_2$ [26, 27], орторомбическую — $FeAl_3$ [28, 29]. При этом в исследованном интервале концентраций (24–32 % (ат.) Fe) электропроводность практически не меняется.

Использование K_{Δ} позволяет прогнозировать формирование наночастиц химических соединений в сплавах системы Al – Fe, поскольку справа и слева площадки электропроводности совпадают с концами перитектической горизонтали (~24 % (ат.) Fe) и эвтектической точки (~32 % (ат.) Fe) (см. рис. 4, б) [30–32].

Сплавы системы Bi – Pb

С учетом результатов работы [4] группой авторов [33, 34] установлено изменение линии ликвидуса. Температура солидуса у сплавов с 0; 1,97; 3,84; 5,6 и 7,4 % (мас.) Pb снижается с 269, 262, 258, 256 до

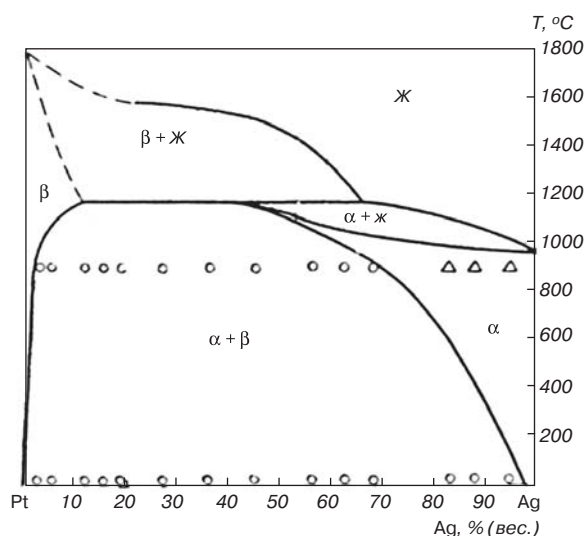


Рис. 3. Диаграмма состояния Pt – Ag [18]

249 °С соответственно; температура эвтектики составляет 124 °С (рис. 5, а). Видно немонотонное изменение интервала кристаллизации — при увеличении содержания Pb с 3,84 до 5,6 % наблюдается снижение температуры ликвидуса на 2 °С, что характерно лишь для сплавов, близких по содержанию к эвтектическому сплаву. Такое изменение на 2 °С может быть характерно для K_{Δ} при содержании Pb ~4,5 %. Этому содержанию Pb соответствуют резкие изменения плотности, элект-

тросопротивления и температурного коэффициента сплава (см. рис. 5, б). По мнению авторов работ [35–37], это может быть объяснено формированием ультрадисперсных частиц β -фазы размером ~0,5 мкм. Учет K_{Δ} в области изгибов ликвидуса (см. рис. 5, б) позволяет объяснить максимальное значение термоЭДС при ~68 % Bi (см. рис. 5, б).

Резкое изменение электропроводности при содержании Pb > 75 % [38], соответствующее средней

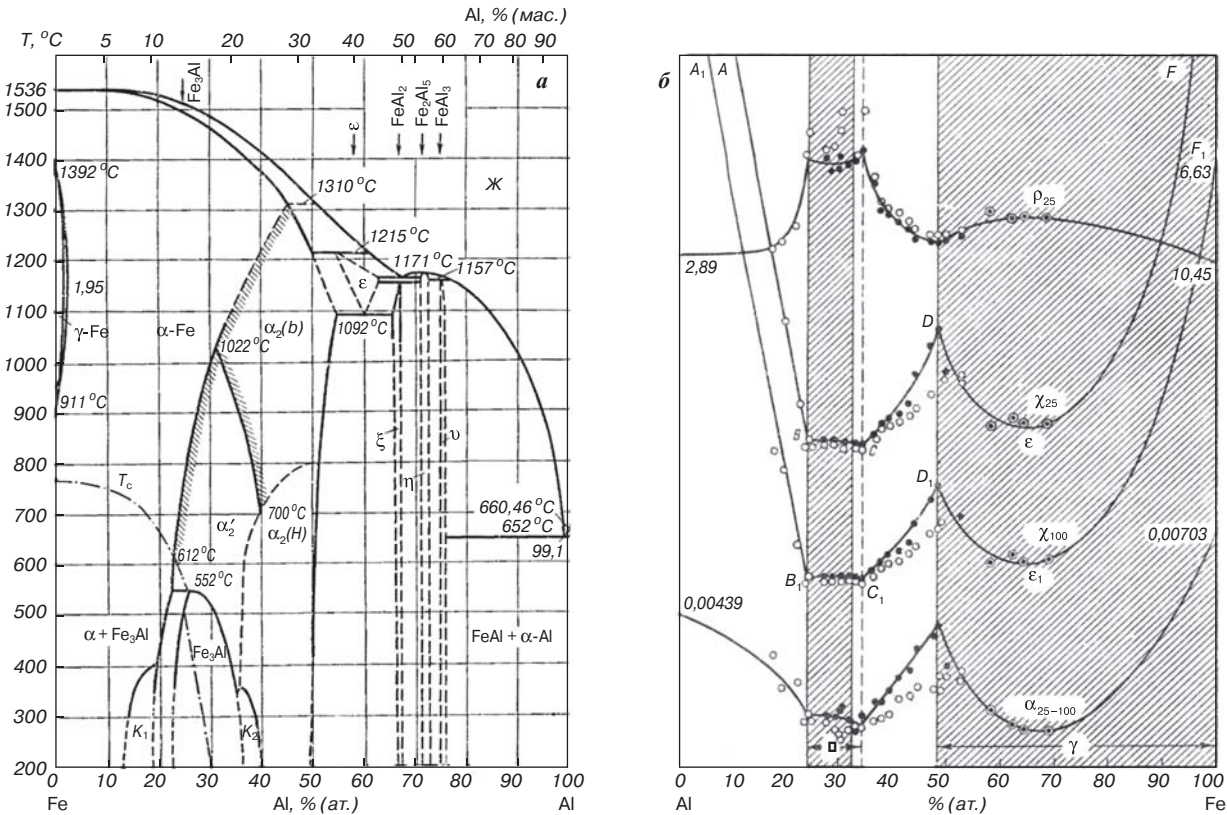


Рис. 4. Связь между диаграммой состояния (а) и электросопротивлением (ρ), удельной электропроводностью (λ) и температурным коэффициентом сопротивления (α) сплавов Al – Fe (б) [18]

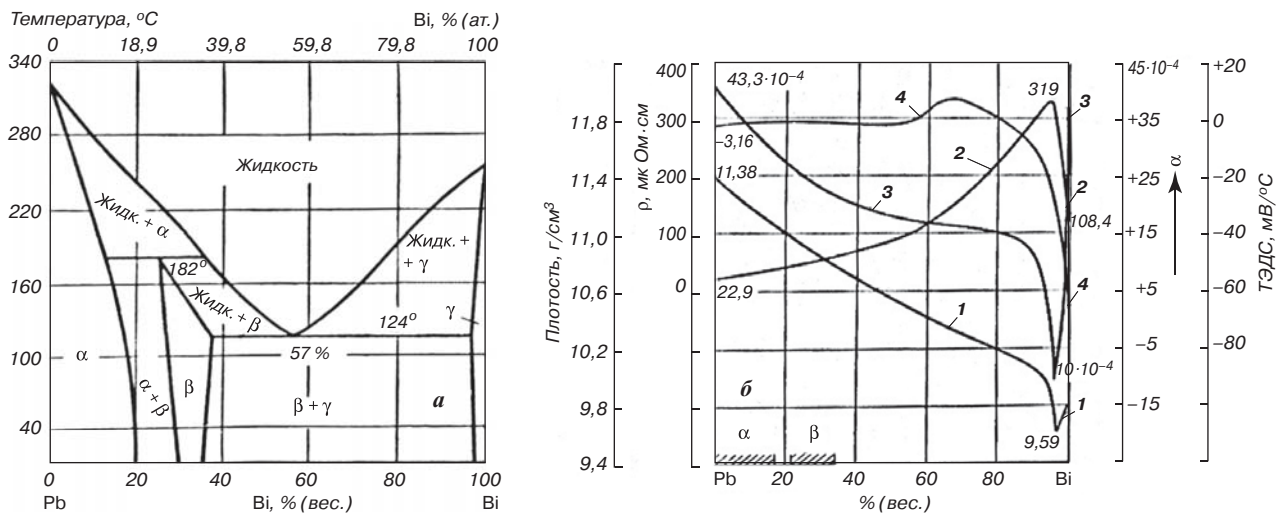


Рис. 5. Связь между диаграммой состояния сплавов системы Bi – Pb (а) [18] и изменением физических свойств сплавов системы Bi – Pb в зависимости от состава (б)

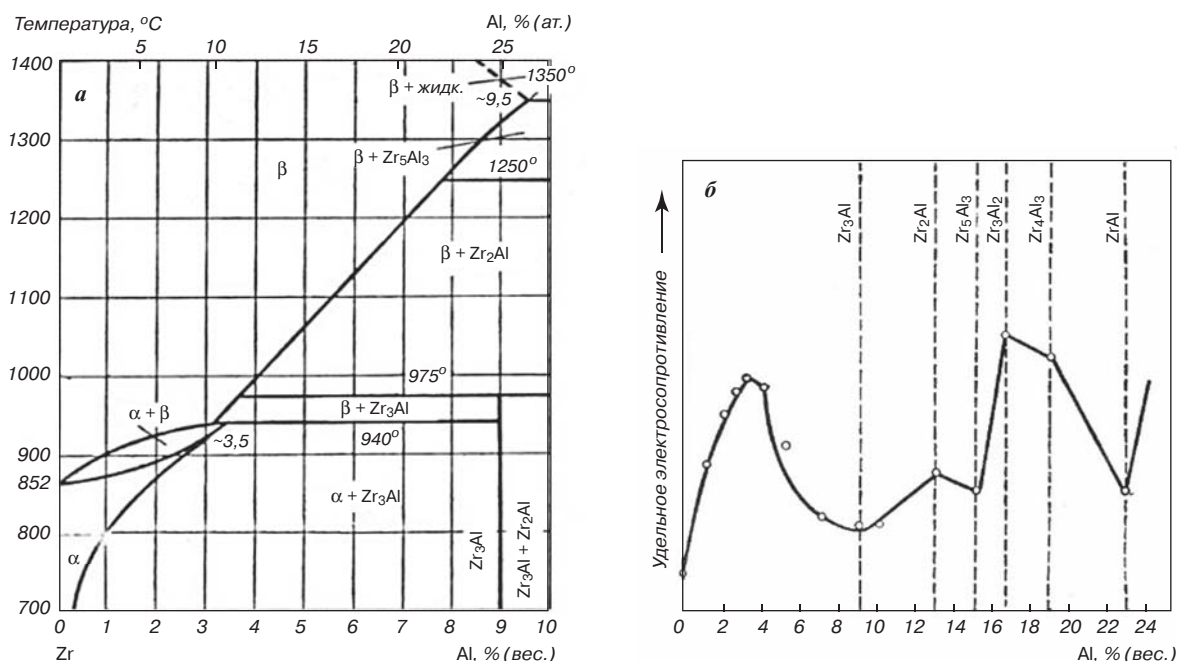


Рис. 6. Взаимосвязь между диаграммой состояния сплавов системы Al – Zr (а) и удельным электросопротивлением (б) [47]

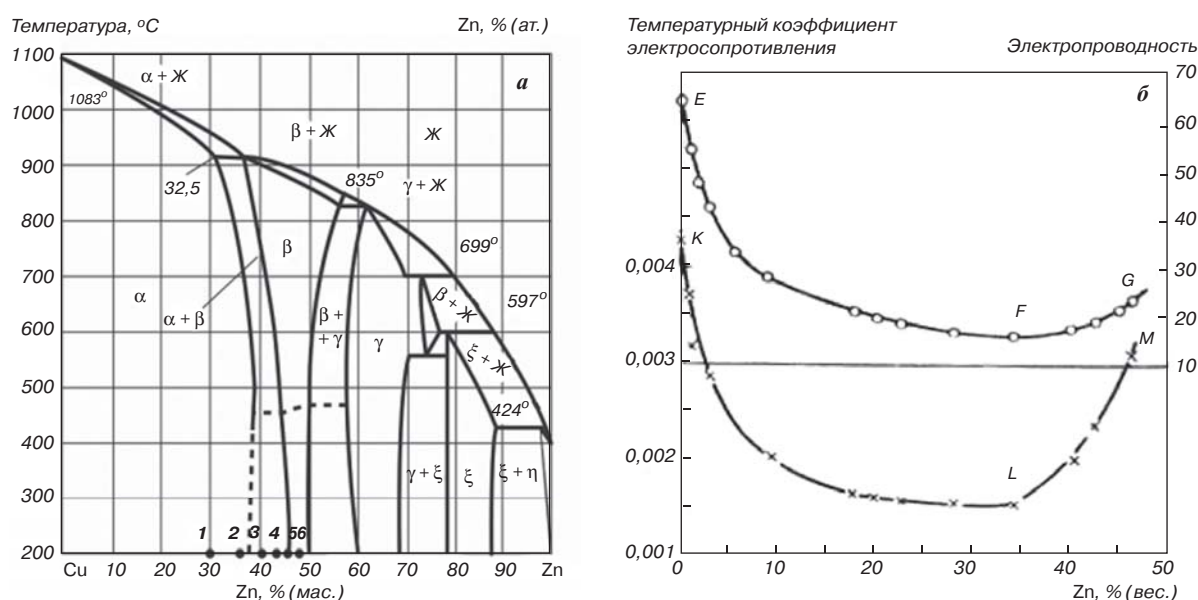


Рис. 7. Взаимосвязь диаграммы состояния системы Cu – Zn (а) с изменением электропроводности и температурного коэффициента электросопротивления (б) [38, 47]

перитектической точке, также свидетельствует о возможности применения K_{Δ} для объяснения свойств сплавов.

Сплавы системы Al – Zr

По данным ряда авторов, в сплавах системы Al – Zr выявлены 6 видов наночастиц промежуточных фаз, таких как Zr_3Al [38, 39], Zr_2Al [40], Zr_5Al_3 [41], Zr_3Al_2 [42], Zr_4Al_3 [43] и $ZrAl$ [44–46]. Дополнительное легирование иттрием приводит к ускорению кинетики выделения дисперсоидов фазы Al_3Zr и формированию частиц фазы $Al_3(Zr, Y)$ размерами 50–80 нм [38].

Анализ данных рис. 6, б показывает, что максимальные и минимальные значения удельного электросопротивления

четко соответствуют обнаруженным видам наночастиц промежуточных фаз. В то же время отсутствуют данные о наличии промежуточной фазы при содержании ~3 % Al, соответствующей пику электросопротивления. Между тем этот состав соответствует концу перитектоидной горизонтали (см. рис. 6, а) [2, 47].

Сплавы системы Cu – Zn

Авторами работ [4, 47, 48] не даны никакие объяснения незначительному изменению электропроводности и температурного коэффициента электросопротивления при содержании ~20–32 % Zn по сравнению с другими концентрационными зонами в сплаве (рис. 7).

По мнению Е. М. Савицкого [48], «есть факты как подтверждающие, так и опровергающие предположение об упорядочении» в сплавах. Между тем использование K_{Δ} при 32,5 % Zn, находящегося вблизи конца перитектической горизонтали (см. рис. 7, а), позволяет дать объяснение этой аномалии.

Выводы

1. Предложен новый подход в объяснении аномалий электрических свойств с формированием наночастиц промежуточных фаз в сплавах цветных металлов на основании разработанного критерия K_{Δ} .

2. Подтверждена возможность применения критерия K_{Δ} для обоснования связи аномалий электрических свойств ряда промышленных цветных сплавов (систем Pt – Ag, Al – Fe, Bi – Pb, Al – Zr, Cu – Zn) с процессами формирования наночастиц промежуточных фаз.

3. Показано, что учет критерия K_{Δ} на промышленном производстве позволит точнее выбирать состав цветных сплавов и способ изготовления заготовок, применяемых при изготовлении изделий, от которых требуются заданные значения электрических свойств.

Вклад авторов

К. Ю. Шахназаров — постановка задачи, анализ литературы, выводы.

С. А. Вологжанина — актуальность работы, постановка цели, поиск информации по формированию наночастиц соединений в системах сплавов.

Р. М. Хузнахметов — подбор литературных источников, анализ системы сплавов Al – Zr.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2024. No. 2. pp. 53–59
DOI: 10.17580/tsm.2024.02.06

A RELATIONSHIP BETWEEN ABNORMAL ELECTRICAL PROPERTIES IN NON-FERROUS ALLOYS AND PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAMS

Information about authors

K. Yu. Shakhnazarov, Professor at the Department of Materials Science and Technology of Art Products¹, Doctor of Technical Sciences, e-mail: Shakhnazarov_KYu@pers.spmi.ru

S. A. Vologzhanina, Professor at the Department of Materials Science and Technology of Art Products¹, Doctor of Technical Sciences, e-mail: vologzhanina_sa@pers.spmi.ru

R. M. Khuznakhmetov, Postgraduate Student of the Department of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: s225045@stud.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

Given the fact that identifying the cause-and-effect mechanisms behind abnormal properties in materials is of enormous importance for science and practical sphere, the authors of this paper propose an approach that allows to establish the relationship between the changing electrical properties and the nanoparticles of intermediate phases forming in non-ferrous metal alloys. A K_{Δ} criterion is proposed that allows to evaluate a possible formation of nanoparticles of chemical compounds (intermediate phases) which significantly influence transformations in the fine structure. This helps relate the extremums on the curves of electrical properties (such as electric conductivity, specific electrical resistance, electrical resistivity, temperature coefficient of electrical resistance, thermoelectromotive force), which can hardly be explained, to the phase equilibrium diagrams of commercial non-ferrous alloys. It becomes possible to consider the phase equilibrium diagram taking into account the developed K_{Δ} criterion, which allows to predict the formation of nanoparticles of intermediate phases and, as a consequence, changes in electrical properties in the systems (Pt – Ag, Al – Fe, Bi – Pb, Al – Zr, Cu – Zn) of non-ferrous alloys.

The developed K_{Δ} criterion enables to determine the causes of: maximum electrical resistivity and its temperature coefficient of silver-platinum alloys; unchangeable electrical resistivity in the concentration range (24–32% (at.) Fe) of aluminium-iron alloys; the spike in conductivity and absolute maximum of thermoelectromotive force of bismuth-lead alloys; maximum specific resistivity of aluminium-zirconium alloys; unchangeable conductivity and temperature coefficient of electrical resistance of copper-zinc alloys.

Key words: nanoparticles of intermediate phases, electrical conductivity, electrical resistance, temperature coefficient of electrical resistance, thermoelectromotive force.

References

1. Sizyakov V. M., Polyakov P. V., Bazhin V. Yu. Production of aluminium and aluminium alloys in Russia: Current trends and strategic objectives. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 16–23.

2. Bazhin V. Y., Savchenkov S. A., Gordevnin N. A. Investigation of the ytterbium reduction process in the synthesis of Al – Yb master alloys for the modification of aluminum alloys. *Non-Ferrous Metals*. 2022. No. 2. pp. 65–72.

3. Brichkin V. N., Vorobiev A. G., Bazhin V. Yu. Mining Institute's metallurgists: a tradition serving the Country, science and production industry. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 4–13.

4. Kurnakov N. S. Selected papers: In 3 volumes. Vol. 2. Moscow: Izdatelstvo AN SSSR, 1961. 612 p.

5. Phase equilibrium diagrams of binary metallic systems. Handbook: In 3 volumes. Vol. 1. Ed. by N. P. Lyakishev. Moscow: Mashinostroenie, 1996. 992 p.

6. Bazhin V. Yu. A contemporary view on anomalies in the metal groups of Mendeleev's Periodic System. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 239. pp. 520–527.

7. Syrkov A. G., Prokopchuk N. R., Vorobiev A. G., Brichkin V. N. Academician N. S. Kurnakov as the founder of physico-chemical analysis – the scientific base for the development of new metal alloys and materials. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 1. pp. 77–83.

8. Parshin A. M., Tikhonov A. N., Bondarenko G. G., Kamyshanchenko N. V. et al. Selected writings on and separate problems of metallurgy. Ed. by A. M. Parshin, A. N. Tikhonov. St Petersburg: Izdatelstvo SPbGTU, 1998. 304 p.

9. Shank F. A. Structures of binary alloys. Moscow: Metallurgiya, 1973. 759 p.

10. Wang Z., Shiyao C., Luo Q. et al. Light-weight refractory high-entropy alloys: a comprehensive review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023. Vol. 151. pp. 41–65.

11. Wang M., Xu Y., Zhang X., Qi P. T. et al. Surface microstructure evolution mechanism of WC – Co hard alloy treated by high current pulsed electron beam. *Vacuum*. 2022. Vol. 202. 111139.

12. Shichalin O. O., Buravlev I., Papynov E. K., Golub A. et al. Comparative study of WC-based hard alloys fabrication via spark plasma sintering using Co, Fe, Ni, Cr, and Ti binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022. Vol. 102. 105725.

13. Fengyan Li, Xiangmin Z., Jing Z. et al. Research on generic technology identification issues in non-ferrous metal industry. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 1955. 012093. DOI: 10.1088/1742-6596/1955/1/012093.

14. Gordeeva Yu. I., Abkaryan A. K. et al. Developing efficient techniques to control the structure and properties of nanoparticle-doped hard-alloy composites. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta*. 2014. Vol. 7, No. 3. pp. 270–289.

15. Bazhin V. Yu., Gorlenkov D. V., Povarov V. G., Vedernikov V. V. Composition, structure and properties of the last silver rubles of the Russian Empire in 1895–1915: continuation of the Petrine traditions of coinage. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 112–124.

16. Dong P., Meng C., Yan Y., Zhang B. et al. Ag–Pt bimetallic composite supported on defective C3Nx nanosheets for plasmon hot electron-mediated photocatalytic H₂ evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48.

17. Novikova O. A. A study of the silver-platinum system. *Zhurnal neorganicheskoy khimii*. 1957. Vol. 11. pp. 1840–1847.

18. Vol A. Ya. Structure and properties of binary metallic systems : In 4 volumes. Vol. 1. Moscow : Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1959. 756 p.
19. Cordero-Santiago J. P., Crespo-Sosa A. Formation of Ag/Pt bimetallic nanoparticles obtained by ion implantation in α -Al₂O₃. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. 2022. Vol. 51. 101051.
20. Takeuchi Y., Lee H.-J., Dao ATN, Kasai H. et al. Formation of multishell Au@ Ag@ Pt nanoparticles by coreduction method: a microscopic study. *Materials Today Chemistry*. 2021. Vol. 21. 100515.
21. Grishchenko N. A., Sidelnikov S. B., Gubanov I. Yu. et al. Mechanical properties of aluminium alloys : Monograph. Krasnoyarsk : Sibirskiy federalnyi universitet, 2012. 196 p.
22. Kurganov Yu. A., Shcherbakov S. P. Effect of the discrete additive of aluminium oxide on the structure and properties of aluminium alloy. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 228. pp. 717–721.
23. Shimosaka D., Ueno M. Effects of Si and Zr addition on strength and recrystallization behavior of Al – Mn alloy fin stocks for automotive heat exchanger. *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 326. DOI: 10.1051/mateconf/202032605006.
24. Školáková A., Pinc J., Novák P. The preferential formation of Ni₂Al₃, Fe₂Al₃, and Ti₂Al₃ phases in aluminide systems. *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 280. 125859.
25. Dubiel S. M., Gondek Ł., Zienert T., Zukrowski J. Mössbauer spectroscopic and XRD studies of two η -Fe₂Al₃ intermetallics. *Intermetallics*. 2021. Vol. 135. 107217.
26. Li J., Chen H. The physical characteristics of tetragonal FeAl₂ under pressure. *Vacuum*. 2022. Vol. 205. 111472.
27. Liu W., Ren X., Shi Y., Niu Y. et al. The effective mass, vibration and electromagnetic properties of tetragonal iron aluminide FeAl₂. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, No. 2. pp. 1766–1771.
28. Zhang N., Hu Q. D., Ding Z., Lu W. et al. 3D morphological evolution and growth mechanism of proeutectic FeAl₃ phases formed at Al/Fe interface under different cooling rates. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022. Vol. 116. pp. 83–93.
29. Wang H. J., Su X. P., Sun S. P., Wang J. H. et al. First-principles calculations to investigate the anisotropic elasticity and thermodynamic properties of FeAl₃ under pressure effect. *Results in Physics*. 2021. Vol. 26. 104361.
30. Gao H., Feng W., Wang Y., Gu J. et al. Structural and compositional evolution of Al₃(Zr, Y) precipitates in Al – Zr – Y alloy. *Materials Characterization*. 2016. Vol. 121. pp. 195–198. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.10.012.
31. Savchenkov S. A., Bazhin V. Y., Brichkin V. N. Thermal analysis of the fabrication of magnesium master alloys containing yttrium and zinc. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. No. 8. pp. 207–218.
32. Aleksandrova T. N., Chanturiya A. V., Kuznetsov V. V. Mineralogical and technological features and patterns of selective disintegration of ferruginous quartzites of the Mikhailovskoye deposit. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 517–526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58.
33. Kumar S., Das A. K. Recent advancements in TIG cladding process on Non-ferrous Alloys: A Review. Dave H. K., Dixit U. S., Nedelcu D. *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems*. Singapore : Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-7787-8_66.
34. Ozan Coban, Ercan Acma M. Combustion synthesis of nanostructured non-ferrous alloys and ceramic powders. *Advances in Combustion Synthesis and Technology*. 2022. pp. 34–65. DOI: 10.2174/9789815050448122010006.
35. Revina A. A., Oksentyuk E. V., Fenin A. A. Synthesis and properties of zinc nanoparticles: the role and prospects of radiation chemistry in the development of modern nanotechnology. *Protection of Metals*. 2007. Vol. 43, No. 6. pp. 554–559. DOI: 10.1134/S0033173207060069.
36. Pryakhin E. I., Sharonov N. I. Basic provisions and problems related to the electron-beam welding technology in application to the fabrication of structures out of aluminium–magnesium alloys. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 229. pp. 84–91.
37. Huang D. et al. New experimental studies on the phase relationship of the Bi–Pb–Te system. *Materials & Design*. 2022. Vol. 224. 111384.
38. Amer S. M., Barkov R. Yu., Pozdnyakov A. V. Effect of impurities on the phase composition and properties of the wrought Al – 6% Cr – 4,05%Er alloy. *Fizika metallov i metalovedenie*. 2020. Vol. 121, No. 5. pp. 550–554.
39. Wei K. et al. In-situ electrochemical study of plasma electrolytic oxidation treated Zr3Al based alloy in 300^o C/14 MPa lithium borate buffer solution. *Thin Solid Films*. 2020. Vol. 707. 138066.
40. Kapidžić A., Belošević-Čavor J., Koteski V. Zirconium aluminides studied with first principles calculations: Hyperfine interactions and site preference of dopants. *Journal of Solid State Chemistry*. 2022. Vol. 310. 123042.
41. Srikanth M. et al. A review of the latest developments in the field of refractory high-entropy alloys. *Crystals*. 2021. Vol. 11, No. 6. 612.
42. López-Arenal J. et al. Scratch, fretting, and sliding wear of a ZrB₂–hardened Zr₃Al₂ intermetallic–ceramic composite. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 23, Iss. 1.
43. López-Arenal J. et al. Powder-metallurgy fabrication of ZrB₂–hardened Zr₃Al₂ intermetallic composites by high-energy ball-milling and reactive spark-plasma sintering. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. pp. 617–626.
44. Samaei A., Chaudhuri S. Role of zirconium conversion coating in corrosion performance of aluminum alloys: An integrated first-principles and multiphysics modeling approach. *Electrochimica Acta*. 2022. Vol. 433. 141195.
45. Jiang X. J. et al. Microstructure and mechanical properties of ZrAl binary alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 811. 152068.
46. Huang Y. et al. Microstructure and mechanical properties of the (TiZrV) 100-xAlx medium-entropy alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 23, Iss. 1. pp. 2824–2835.
47. Kornilov I. I. The physics and chemistry behind heat resistance of alloys. Moscow : Izdatelstvo AN SSSR, 1961. 516 p.
48. Savitskiy E. M. Effect of temperature on the mechanical properties of metals and alloys. Moscow : Izdatelstvo AN SSSR, 1957. 295 p.

НОВОСТИ:

- ГОРНОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
- ИЗДАТЕЛЬСКОГО ДОМА «РУДА И МЕТАЛЛЫ»

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА TELEGRAM-КАНАЛ
t.me/OreMet

РЕКЛАМА

12+