

## ПОВЕРХНОСТЬ ЛИКВИДУСА СИСТЕМЫ Cu–Ni–Si

Е.А. Трофимов, С.В. Рябошук, О.В. Никонова

Осуществлено моделирование фазовых равновесий, реализующихся в медном угле диаграммы состояния системы Cu–Ni–Si, в условиях существования металлического расплава. Результаты представлены в виде проекции поверхности ликвидуса для этой системы. Результаты работы могут быть использованы для анализа технологических процессов производства меди и сплавов на ее основе.

*Ключевые слова:* фазовые равновесия, поверхность ликвидуса, система Cu–Ni–Si, силициды никеля.

Известно, что кремнисто-никелевые бронзы (низколегированные сплавы системы Cu–Ni–Si) представляют интерес как материалы с удачным сочетанием высокой прочности, жаропрочности, тепло- и электропроводности. Такие бронзы находят применение при производстве антифрикционных деталей, в авиамоторостроении и электротехнике [1–3].

Свойства этих сплавов в значительной степени обусловлены взаимодействием их компонентов в жидком металле в процессе их выплавки, а также в процессе кристаллизации металла.

Ранее [4–6] нами различными методами было выполнено термодинамическое моделирование и экспериментальное исследование фазовых равновесий, реализующихся в системе Cu–Ni–Si. Результаты расчетов были представлены в виде  $T$ - $x$ -фазовых диаграмм традиционного вида. В ходе других работ [7–9] были построены ПРКМ систем Cu–Ni–O, Cu–Si–O и Cu–Ni–Si–O. Таким образом, фазовые равновесия в этих системах были представлены в форме, удобной для рассмотрения того, как изменения в составе металлического расплава сказываются на качественных изменениях в составе равновесных с металлом сложных фаз.

Цель настоящей работы – представить результаты моделирования фазовых равновесий в системе Cu–Ni–Si в аналогичной, удобной для анализа форме – в виде проекции поверхности ликвидуса.

В ходе настоящей работы для расчетов составов равновесных фаз и визуализации результатов таких расчетов использован программный пакет FactSage (версия 6.0) производства GTT Technologies (Канада, Германия)<sup>1</sup>. В процессе расчета использована база данных SGTE.

Адекватность моделирования трехкомпонентной системы в значительной степени зависит от корректности параметрического обеспечения расчета фазовых равновесий в граничных двухкомпонентных системах. С целью проверки степени оптимизированности модельных параметров предва-

рительно были рассчитаны диаграммы состояния двойных систем Cu–Ni (рис. 1), Cu–Si (рис. 2) и Ni–Si (рис. 3). Сопоставление результатов расчета с данными по диаграммам состояния двойных систем, представленными в справочниках [11–14], свидетельствует о корректности используемой параметрической базы.

В процессе расчета координат поверхности ликвидуса трехкомпонентной системы учитывалась возможность существования всех силицидов, характерных для двойных диаграмм состояния систем Cu–Si и Ni–Si, и не учитывалась возможность образования соединения между тремя элементами.

На рис. 4. представлены результаты проведенного расчета. Интервал концентраций, для которого проведен расчет: 0–10 мас. % Ni и 0–5 мас. % Si.

На рис. 4 представлены изотермы, принадлежащие интервалу температур 1100–1250 °C с шагом 25 °C. Согласно проведенному расчету, в исследованном интервале температур и концентраций в равновесии с металлическим расплавом могут находиться четыре разновидности силицидных фаз. Все они – силициды никеля: Ni<sub>3</sub>Si, Ni<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>, Ni<sub>2</sub>Si и  $\theta$ -фаза переменного состава, границы существования которой при различных температурах лежат между стехиометрическими составами Ni<sub>2</sub>Si и Ni<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.

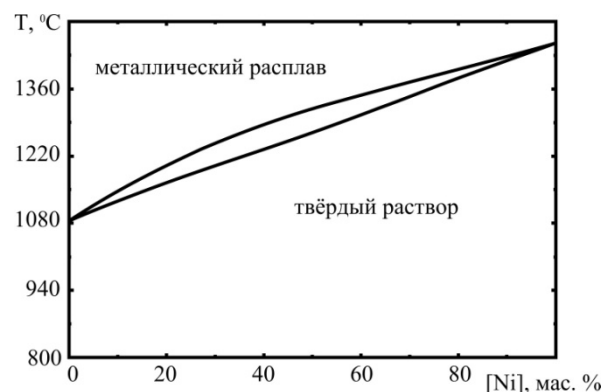


Рис. 1. Результаты расчета диаграммы состояния системы Cu–Ni

<sup>1</sup> Версия пакета, принадлежащая ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

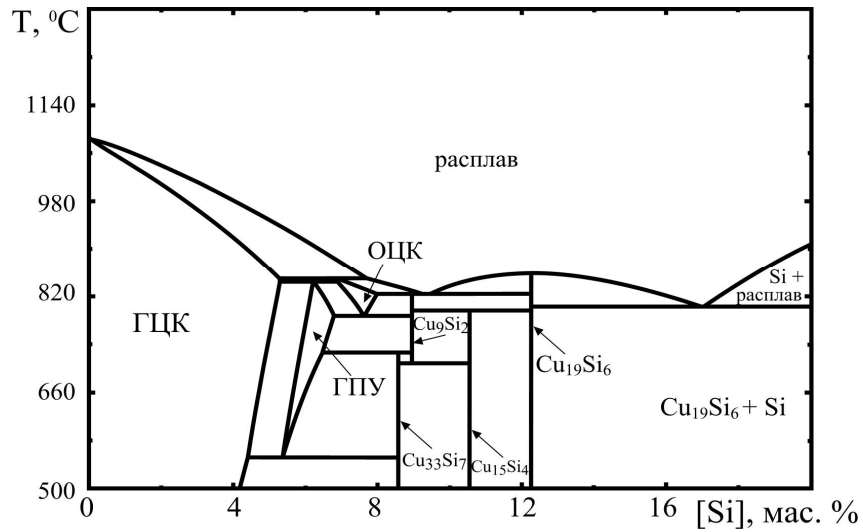


Рис. 2. Результаты расчета диаграммы состояния системы Cu-Si

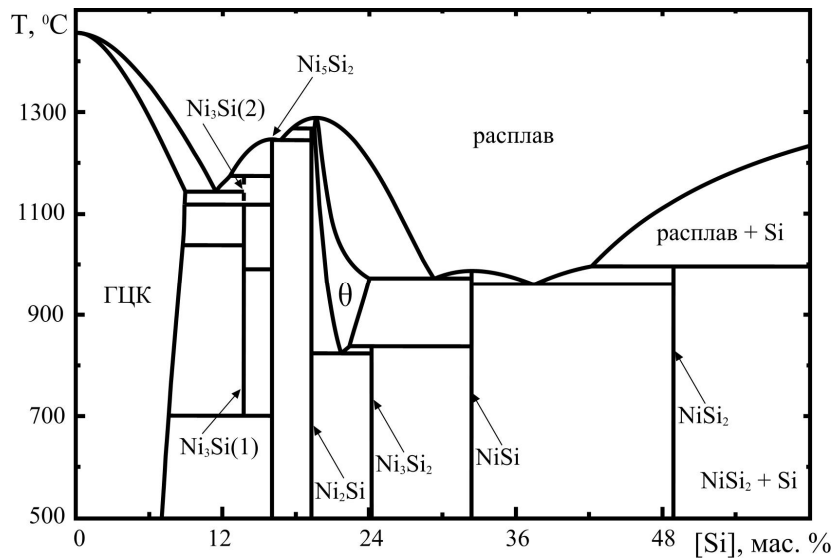


Рис. 3. Результаты расчета диаграммы состояния системы Ni-Si

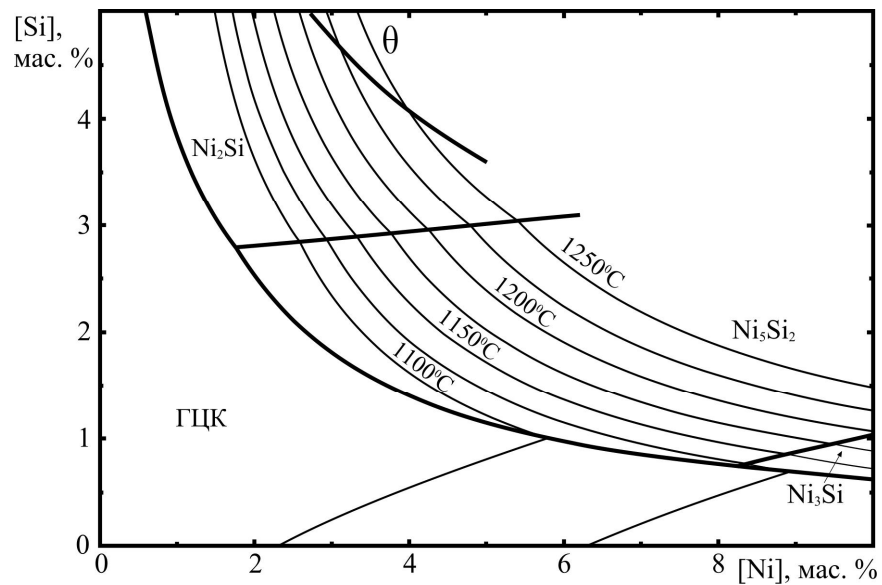


Рис. 4. Проекция поверхности ликвидуса для системы Cu-Ni-Si

### Заключение

Осуществлен расчет фазовых равновесий, реализующихся в медном углу диаграммы состояния системы Cu–Ni–Si. Результаты представлены в виде проекции поверхности ликвидуса для этой системы, которая позволяет судить о том, как изменения в составе металлического расплава сказываются на качественных изменениях в составе равновесных с металлом силицидных фаз.

Работа осуществлена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 13-08-00545.

### Литература

1. Машиностроительные материалы: крат. справ. / В.М. Раскатов, В.С. Чуенков, Н.Ф. Бессонова, Д.А. Вейс. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
2. Машиностроение: энциклопед. справ. Раздел второй. Материалы машиностроения. Т. 4. / под ред. Е.А. Чудакова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1947. – 428 с.
3. Phase equilibria of the Cu–Ni–Si system at 700 °C / W. Sun, H. Xu, Sh. Liu et al. // *J. Alloys and Compounds*. – 2011. – Vol. 509, no. 41 – P. 9776–9781.
4. Самойлова, О.В. Изучение результатов процесса образования силицидов никеля в системе Cu–Ni–Si в условиях существования металлического расплава на основе меди / О.В. Самойлова, Г.Г. Михайлов, Е.А. Трофимов // *Расплавы*. – 2007. – № 4. – С. 37–41.
5. Трофимов, Е.А. Расчет изотермических сечений фазовой диаграммы системы Cu–Si–Ni / Е.А. Трофимов, О.В. Самойлова, Г.Г. Михайлов // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2011. – Вып. 17, № 36 (253). – С. 7–10.
6. Термодинамическое моделирование линии ликвидус системы Ni–Si / О.В. Самойлова, Л.А. Макроев, Г.Г. Михайлов, Е.А. Трофимов // *Вест.*

*Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Химия»*. – 2012. – Вып. 9, № 24 (283). – С. 69–73.

7. Термодинамика процессов взаимодействия в системе Cu–Ni–O / Г.Г. Михайлов, О.В. Самойлова, Е.А. Трофимов и др. // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2008. – Вып. 10. – № 9 (109). – С. 31–33.

8. Трансформация неметаллических включений, образующихся в ходе взаимодействия в медном расплаве, содержащем никель и кислород / О.В. Самойлова, Г.Г. Михайлов, И.Ю. Пашикеев, Е.А. Трофимов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2009. – № 5. – С. 7–9.

9. Совершенствование параметрической базы, необходимой для термодинамического моделирования огневого рафинирования меди / Г.Г. Михайлов, О.В. Самойлова, Е.А. Трофимов, Л.А. Макроев // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия»*. – 2010. – Вып. 15, № 34 (210). – С. 35–38.

10. Термодинамический анализ системы Cu–Si–Ni–O / О.В. Самойлова, Л.А. Макроев, Г.Г. Михайлов, Е.А. Трофимов // *Известия вузов. Цветная металлургия* – 2012. – № 3. – С. 12–16.

11. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. / под ред. М.Е. Дрица; Институт металлургии им. А.А. Байкова. – М.: Наука, 1979. – 248 с.

12. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1024 с.

13. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1999. – Т. 3, кн. 1. – 880 с.

14. Binary Alloy Phase Diagrams. Second Edition. V. 1-3. / Ed. T.B. Massalski. – Ohio: ASM International, Materials Park, 1990.

**Трофимов Евгений Алексеевич**, кандидат химических наук, доцент кафедры общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. 456209, Челябинская обл., г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. Тел.: (3513)665829. E-mail: tea7510@gmail.com.

**Рябошук Сергей Владимирович**, ассистент кафедры металлургических технологий, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. E-mail: cmd\_84@mail.ru.

**Никонова Ольга Владимировна**, инженер кафедры общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте. 456209, Челябинская обл., г. Златоуст, ул. Тургенева, 16. E-mail: nikonovaolga90@mail.ru.

## LIQUIDUS SURFACE OF THE Cu–Ni–Si SYSTEM

**E.A. Trofimov**, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Chelyabinsk region, Russian Federation, tea7510@gmail.com,

**S.V. Ryaboshuk**, St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russian Federation, cmd\_84@mail.ru,

**O.V. Nikonova**, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Chelyabinsk region, Russian Federation, nikonovaolga90@mail.ru

Modeling of phase equilibria for the copper corner of the phase diagram of the Cu–Ni–Si system is carried out. Results are shown as projections of the liquidus surface of the system. These results can be used to analyze the production process of copper and copper-based alloys.

Keywords: phase equilibrium, liquidus surface, Cu–Ni–Si system, nickel silicide.

### References

1. Raskatov V.M., Chuenkov V.S., Bessonova N.F., Veys D.A. *Mashinostroitel'nye materialy* [Engineering Materials]. Moscow, Mashinostroenie, 1980. 511 p.
2. *Mashinostroenie: Entsikloped. spravochnik. Razdel 2. Materialy mashinostroeniya* [Mechanical Engineering: Encyclopedic Handbook. Section 2. Engineering Materials]. Ed. by E.A. Chudakov. Moscow, 1947. 428 p.
3. Sun W., Xu H., Liu Sh., Du Y., Yuan Zh., Huang B. Phase Equilibria of the Cu–Ni–Si System at 700 °C. *J. Alloys and Compounds*, 2011, v. 509, no. 41, pp. 9776–9781.
4. Samoiloval O.V., Mikhaylov G.G., Trofimov E.A. Study Results of the Nickel Silicides Formation in the Molten Metal in the Cu–Ni–Si System [Izuchenie rezul'tatov protsesssa obrazovaniya silitsidov nikelya v sisteme Cu–Ni–Si v usloviyakh sushchestvovaniya metallichesкого расплава na osnove medi]. *Rasplavy*, 2007, no. 4, pp. 37–41.
5. Trofimov E.A., Samoiloval O.V., Mikhaylov G.G. Calculation of Isothermal Sections of Phase Diagram for Cu–Si–Ni System [Raschet izotermicheskikh secheniy fazovoy diagrammy sistemy Cu–Si–Ni]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2011, no. 36 (253), issue 17, pp. 7–10.
6. Samoiloval O.V., Makrovets L.A., Mikhaylov G.G., Trofimov E.A. Thermodynamic Modeling of Liquidus Line of Ni–Si System [Termodinamicheskoe modelirovanie linii likvidus sistemy Ni–Si]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Chemistry"*, 2012, no. 24, issue 9, pp. 69–73.
7. Mikhaylov G.G., Samoiloval O.V., Trofimov E.A., Sidorenko A.Yu., Pashkeev I.Yu. Thermodynamic Analysis of Interaction in the Cu–Ni–O System [Termodinamicheskii analiz protsessov vzaimodeystviya v sisteme Cu–Ni–O]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2008, no. 9 (109), issue 10, pp. 31–33.
8. Samoiloval O.V., Mikhaylov G.G., Pashkeev I.Yu., Trofimov E.A. Transformation of Non-Metallic Inclusions Formed During Interaction in a Cupreous Melt Containing Nickel and Oxygen. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2009, vol. 50, no. 5, pp. 437–440. doi: 10.3103/S1067821209050010.
9. Mikhaylov G.G., Samoiloval O.V., Trofimov E.A., Makrovets L.A. Adjustment of Thermodynamical Parameter Base for Modeling Copper Melt Fire Refining [Sovershenstvovanie parametricheskoy bazy, neobkhodimoy dlya termodinamicheskogo modelirovaniya ogneвого rafinirovaniya medi]. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*, 2010, no. 34 (210), issue 15, pp. 35–38.
10. Samoiloval O.V., Makrovets L.A., Mikhaylov G.G., Trofimov E.A. Thermodynamic Analysis of the Cu–Si–Ni–O System. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 223–228. doi: 10.3103/S1067821212030182.
11. *Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Binary and Multicomponent Systems Based on Copper]. Ed. by M.E. Drits. Moscow, Nauka, 1979. 248 p.

12. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih system. Tom 2.* [Diagrams of Binary Metal Systems. Vol. 2]. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie, 1997. 1024 p.

13. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih system. Tom 3. Kniga 1.* [Diagrams of Binary Metal Systems. Vol. 3. Part 1]. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie, 1999. 880 p.

14. *Binary Alloy Phase Diagrams. Second Edition. Vol. 1–3.* Ed. by T.B. Massalski. Materials Park, Ohio, ASM International, 1990.

*Поступила в редакцию 19 сентября 2013 г.*