

значительными, но за счет их большого количества они приводят заметному суммарному результату.

Литература

1. Бережливое производство. Основные положения и словарь : ГОСТ Р 56020-2014. – Стандартиформ. – Введ. 01.03.2015. – 15 с.

2. Вумек, Д. Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Д. Вумек, Д. Джонс. – Изд.: Альпина Паблишер, 2022. – 472 с.

3. Хироюки, Хирано. 5S для рабочих : как улучшить свое рабочее место / Хироюки Хирано. – Изд.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 158 с.

4. Шук, Д. Учитесь видеть бизнес-процессы: Практика построения карт потоков создания ценности / Д. Шук, М. Ротер. – Изд.: Альпина Паблишер. – 2015. – 136 с.

5. Масааки, Имаи. Гемба Кайдзен. Путь к снижению затрат и повышению качества / Имаи Масааки. – Изд.: Альпина Паблишер. – 2022. – 414 с.

УДК 621

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИКВИДУСА ТРОЙНОЙ СИСТЕМЫ Au-Ge-Sb МЕТОДОМ СИМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Джураев Т.Д., Рахимов Ф.К., Мирзоева Б.М.

*ТТУ имени академика М. Осими
Душанбе, Республика Таджикистан*

Аннотация. В статье изучено и построено поверхность ликвидуса диаграммы состояния трехкомпонентной системы золота-германий-сурьма методом симплексного планирования экспериментов.

Ключевые слова: золота, германий, сурьма, сплав, диаграмма, ликвидус, симплекс, температура, раствор, эвтектика, плавления, матрица.

CONSTRUCTION OF THE LIQUIDUS TRIPLE SURFACE Au-Ge-Sb SYSTEMS BY THE SIMPLEX PLANNING METHOD

Dzhuraev T., Rakhimov F., Mirzoeva B., Nimonov R.

*TTU named after Academician M. Osimi
Dushanbe, Republic of Tajikistan*

Abstract. In the article, the liquidus surface of the state diagram of the three-component gold-germanium-antimony system was studied and constructed by the method of simplex planning of experiments.

Key words: gold, germanium, antimony, alloy, diagram, liquidus, simplex, temperature, solution, eutectic, melting, matrix.

*Адрес для переписки: Джураев Т.Д., пр. акад. Радажабовых, 10, Душанбе 734042, Республика Таджикистан
e-mail: mcm45@mail.ru*

Сплавы золота с германием обладают хорошими литейными свойствами, увеличиваются в объеме при затвердевании, поэтому могут служить для изготовления точных отливок. Эвтектический состав сплава золота с германием, характеризующийся высокой твердостью, предложен для нанесения твердых покрытий на золоте или на изделиях, покрытых золотом [1].

Для создание новых легкоплавких составов сплавов на основе золота с германием используется дополнительное легирование.

Таким легирующим компонентом в данном случае является сурьма, которая образует, как с золотом, так и с германием легкоплавкие эвтектические сплавы [1].

Сплав золото – сурьма применяют в радиоэлектронике для покрытия контактов, а также в медицинской промышленности для покрытия различного инструмента.

Покрытия сплавами золота с сурьмой характеризуются высокой твердостью и износостойкостью. Эти сплавы перспективны для их использования в качестве контактного материала, а также в производстве транзисторов.

Анализ показывает [2] что двойные диаграммы состояния систем Au-Ge, Au-Sb и Ge-Sb построены. В системе золото – германий наблюдается эвтектическое превращение при температуре 361 °С и содержании 28 % (ат.) германия (рис. 1). В твердом состоянии максимальная растворимость Ge в Au составляет 3,0 % (ат.).

Установлено, что золото с сурьмой образует диаграмму состояния с эвтектикой которая плавится при 360 °С и содержании 34,8 % (ат.) сурьмы [2]. При кристаллизации в системе наблюдается образование по перитектической реакции при температуре 460°С соединения AuSb₂, имеющего узкую область гомогенности (рис. 1). Растворимость Sb в твердом состоянии Au при различных температурах составляет в % (ат.): 1,12, 1,10, 0,91, 0,64 и 0,34, соответственно, при температурах 600, 500, 400, 360 и 300 °С.

Сплавы системы Ge-Sb представляют собой эвтектическую механическую смесь. В системе установлено эвтектическое равновесие между Ge-Sb, которое осуществляется при температуре 592°С и содержании 85,5% (ат.) Sb (см. рис. 1).

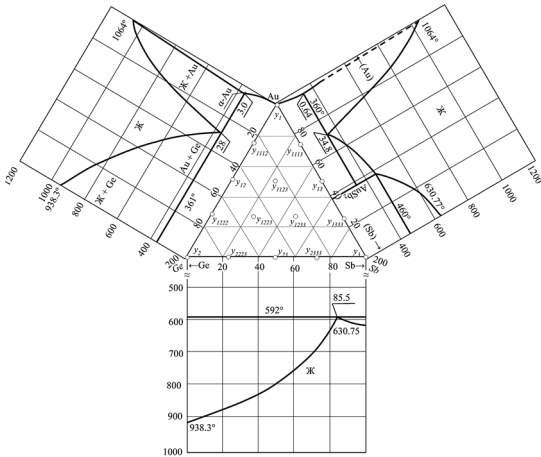


Рисунок 1 – Развертка тройной системы Au-Ge-Sb

В настоящее время представляют интерес математические методы планирования экспериментов, позволяющие уменьшить материальные затраты и получить требуемые результаты [3, 4]. Сущность одного из таких методов, предложен Шеффе [3].

Нами для построения поверхности ликвидуса системы Au-Ge-Sb математическая модель и формулы для расчета коэффициентов выводились аналогично работе [4].

Была выбрана модель четвертой степени для трехкомпонентной системы:

$$\begin{aligned}
 y = & \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j + \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \gamma_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j)^2 + \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i^2 x_j x_k + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i x_j^2 x_k x_l + \\
 & + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \sum_{1 \leq i < j < k < l \leq q} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

где y – свойство системы, т.е. температура плавления; $\beta_i, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$ и β_{ijkl} – коэффициенты регрессии и x_i, x_j и x_k – число компонентов.

Матрица планирования и результаты экспериментальных данных (см. табл.) по двойным диаграммам состояния составляющие систему Au-Ge-Sb брались из данных рис. 1. Температура плавления сплавов, лежащих в центре концентрационного треугольника (рис. 1), определена по данным термического анализа [5].

По результатам определения температуры плавления сплавов рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
 \beta_1 = y_1 &= 1064; \\
 \beta_2 = y_2 &= 938; \\
 \beta_3 = y_3 &= 630; \\
 \beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2 &= -1544;
 \end{aligned}$$

$$\beta_{13} = 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3 = -1628;$$

$$\beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3 = 104;$$

$$\gamma_{12} = 8/3 (-y_1 + 2y_{112} - 2y_{122} + y_2) = -1482,67;$$

$$\gamma_{13} = 8/3 (-y_1 + 2y_{113} - 2y_{133} + y_3) = -2037,33;$$

$$\gamma_{23} = 8/3 (-y_2 + 2y_{223} - 2y_{233} + y_3) = -5,333;$$

$$\delta_{12} = 8/3 (-y_1 + 4y_{1112} - 6y_{1122} + 4y_{1222} - y_2) = -938,667;$$

$$\delta_{13} = 8/3 (-y_1 + 4y_{1113} - 6y_{1133} + 4y_{1333} - y_3) = -1584;$$

$$\delta_{23} = 8/3 (-y_2 + 4y_{2223} - 6y_{2233} + 4y_{2333} - y_3) = -549,333;$$

$$\beta_{1123} = 32 (3y_{1123} - y_{1223} - y_{1233}) + 8/3 (6y_1 - y_2 - y_3) - 16 (y_{12} + y_{13}) - 16/3 (5y_{1112} + 5y_{1113} - 3y_{1222} - 3y_{1333} - y_{2223} - y_{2333}) = 12266,66;$$

$$\beta_{1223} = 32 (3y_{1223} - y_{1123} - y_{1233}) + 8/3 (6y_2 - y_1 - y_3) - 16 (y_{12} + y_{23}) - 16/3 (5y_{1222} + 5y_{2223} - 3y_{1112} - 3y_{2333} - y_{1113} - y_{1333}) = -1109,33;$$

$$\beta_{1233} = 32 (3y_{1233} - y_{1123} - y_{1233}) + 8/3 (6y_3 - y_1 - y_2) - 16 (y_{13} + y_{23}) - 16/3 (5y_{1333} + 5y_{2333} - 3y_{1113} - 3y_{2223} - y_{1112} - y_{1222}) = -2325,33.$$

Таким образом, модель четвертой степени поверхности ликвидуса системы золото-германий-сурьма по данным таблицы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y = & 1064x_1 + 938,3x_2 + 630x_3 - 1544x_1x_2 - \\
 & - 1628x_1x_3 + 104x_2x_3 - 1482,67x_1x_2(x_1 - x_2) - \\
 & - 2037,33x_1x_3(x_1 - x_3) - 5,333x_2x_3(x_2 - x_3) - \\
 & - 938,667x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 1584x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - \\
 & - 549,33x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 12266,66x_1^2x_2x_3 - \\
 & - 1109,33x_1x_2^2x_3 - 2325,33x_1x_2x_3^2,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1, x_2 и x_3 – содержание в сплавах Au, Ge и Sb в атомных долях.

Полученное уравнение регрессии (1) позволяет не только предсказывать температуру начала кристаллизации сплавов данной системы без дополнительных экспериментов, но и определять области, линии и точки фазовых равновесий.

Для геометрического представления полученной поверхности ликвидуса строили изотермы ликвидуса через каждые 50 °C (две линии ликвидуса через 25 °C, см. рис. 2). Все вычисления проводили на ЭВМ.

Полученная проекция системы (рис. 2) хорошо передает геометрический образ поверхности ликвидуса. Выявляются три области первичной кристаллизации двойных сплавов эвтектических смесей. Кристаллизация всех трех областей сплавов заканчивается образованием тройной эвтектической механической смеси состоящий из трех твердых растворов на основе чистых компонентов. Равновесие наступает при температуре 355 °C и содержании 92 % ат. Au, 7,5 % ат. Ge и 0,5 % ат. Sb, по реакции $Ж \rightleftharpoons \alpha\text{-Au} + \beta\text{-Ge} + \gamma\text{-Sb}$.

Таблица. Матрица планирования и результаты эксперимента системы Au-Ge-Sb

№/№ п/п	Код сплава	Состав сплавов						Температура ликвидуса, °С
		в кодовом масштабе, доли единиц			в натуральном выражении ат.%			
		x_1	x_2	x_3	Au	Ge	Sb	
1	y_1	1,0	0,0	0,0	100	0	0	1064
2	y_2	0,0	1,0	0,0	0	100	0	938
3	y_3	0,0	0,0	1,0	0	0	100	630
4	y_{12}	0,5	0,5	0,0	50	50	0	615
5	y_{13}	0,5	0,0	0,5	50	0	50	440
6	y_{23}	0,0	0,5	0,5	0	50	50	810
7	y_{112}	0,75	0,25	0,00	75	25	0	560
8	y_{122}	0,25	0,75	0,00	25	75	0	775
9	y_{113}	0,75	0,00	0,25	75	0	25	385
10	y_{133}	0,25	0,00	0,75	25	0	75	550
11	y_{223}	0,00	0,75	0,25	0	75	25	870
12	y_{233}	0,00	0,25	0,75	0	25	75	717
13	y_{1123}	0,50	0,25	0,25	50	25	25	550
14	y_{1223}	0,25	0,50	0,25	25	50	25	670
15	y_{1233}	0,25	0,25	0,50	25	25	50	610

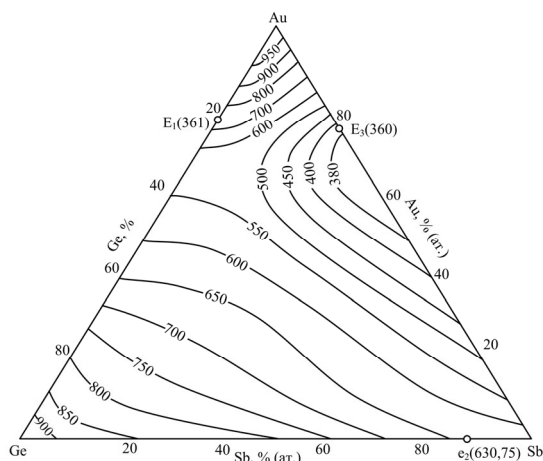


Рисунок 2 – Проекция поверхности ликвидуса тройной системы Au-Ge-Sb

Литература

1. Справочник химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chem21.info/info/1656899>.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. акад. РАН Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996, 1997. – Т. 1, 2, 992. – 1024 с.
3. Новик, Ф. С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел IV / Ф. С. Новик. – М., 1970. – 149 с.
4. Джураев, Т. Д. Изучение диаграммы состояния системы Sr-Ba-Al методом симплексных решеток / Т. Д. Джураев, А. В. Вахобов, К. К. Эшонов // Журн. Заводская лаборатория. – 1975. – Т. 41, № 3. – С. 335–337.
5. Разработка универсальной установки для определения теплофизических свойств веществ / Т. Д. Джураев [и др.] // Материалы VI-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», посвященной 20-летию XVI сессии верховного совета Республики Таджикистан. – Душанбе: ТТУ им. М. С. Осими, 2012.

УДК 621.31/36

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА КАЛИБРОВКИ КОНТРОЛЬНЫХ СИТ Коробко Ю.С., Булыга Д.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены актуальные вопросы калибровки контрольных сит, применяемых в различных отраслях народного хозяйства.

Ключевые слова: контрольные сита, аттестация, калибровка, метод калибровки, рабочее место калибровщика.

OPTIMIZATION OF GEOMETRIC MEASUREMENTS INSTRUMENT CALIBRATION

Korobko Yu., Buliga D.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Topical issues of calibration of control sieves used in various sectors of the national economy are considered.
Key words: measurement, calibration, calibration method, calibrator workplace.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by