

**Расчет температур плавления резистивных сплавов систем
Co-Cr-Si и Co-Cr-La-Si**

Студент Гладинев А.Д.
Научный руководитель Зеленин В.А.
Белорусский национальный технический университет
Республика Беларусь, г. Минск

Температуры плавления и химический состав резистивных сплавов системы Co-Cr-Si марок РС5406 К, РС6012 и РС2802 приведены в таблице.

Таблица – Температуры плавления (кристаллизации) и химический состав резистивных сплавов системы Co-Cr-Si [1].

Марка сплава	Температура плавления, ± 15 °С	Содержание компонентов, мас.% / ат. %		
		Co	Cr	Si
РС 5406 К	1400	6,0 / 4,0	54,0 / 40,5	40,0 / 55,5
РС 6012	1250	60,0 / 45,2	12,0 / 9,6	28,0 / 45,2
РС 2802	1300	28,0 / 15,6	2,0 / 1,4	70,0 / 83,0

1 Расчет температур плавления эвтектик в системе Co-Cr-Si

Расчет температур плавления тройных эвтектик в системе Co-Cr-Si сводим в соответствии с [2] к расчету двойных систем (CoSi₂-Si)_{эвт} - (CrSi₂-Si)_{эвт} и (Co₂Si-CoSi)_{эвт} - (CrSi-CrSi₂)_{эвт}. Температуры плавления двойных эвтектик взяты из диаграмм состояния систем Co-Si и Cr-Si [3].

1.1 Для системы (CoSi₂-Si)_{эвт} - (CrSi₂-Si)_{эвт}

$$X = (1305 - 1259) / (1305 + 1259)^{0,74} = 46/333,1 = 0,1381.$$

$$K_{эвт} = 0,497 \exp(-0,2657 \times 0,1381) = 0,4791.$$

$$T_{эвт} = 0,467 \times (1305 + 1259) = 1228,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Принимая $T_{эвт} = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$, определяем концентрации элементов в тройной эвтектике E_1 по формуле

$$C^1_{эвт} = [(T_2 - T_{эвт}) / (T_1 + T_2 - 2T_{эвт})] \times 100 \%,$$

$$C^1_{эвт} = 100 \times (1259 - 1230) / (2564 - 2460) = 27,9 \text{ мас. \% (CrSi}_2\text{-Si)}_{эвт}.$$

Концентрация (CoSi₂-Si)_{эвт} в тройной эвтектике составляет 72,1 мас. %. В 72,1 мас. % эвтектики CoSi₂-Si, состоящей из 38,0 мас.% Co и 62,0 мас. % Si, содержится 27,4 мас. % Co и 44,7 мас. % Si. В 27,9 мас. % эвтектики CrSi₂-Si состава 29,0 мас. % Cr и 71,0 мас. % Si содержится 8,1 мас. % Cr и 19,8 мас. % Si.

Таким образом, установлено, что эвтектика E_1 в тройной системе Co-Cr-Si плавится при температуре $T_{эвт} = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$ и содержит 27,4 мас. (15,9 ат.) % Co, 8,1 мас. (5,3 ат.) % Cr и 64,5 мас. (78,8 ат.) % Si.

1.2 Для системы (Co₂Si-CoSi)_{эвт} - (CrSi-CrSi₂)_{эвт}.

$$X = (1390 - 1286) / (1390 + 1286)^{0,74} = 104/343,8 = 0,3025.$$

$$K_{эвт} = 0,497 \exp(-0,2657 \times 0,3025) = 0,4586.$$

$$T_{эвт} = 0,4586 \times (1390 + 1286) = 1227,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Принимая $T_{эвт} = 1230 \text{ }^\circ\text{C}$, определяем концентрации элементов в тройной эвтектике E_2 .

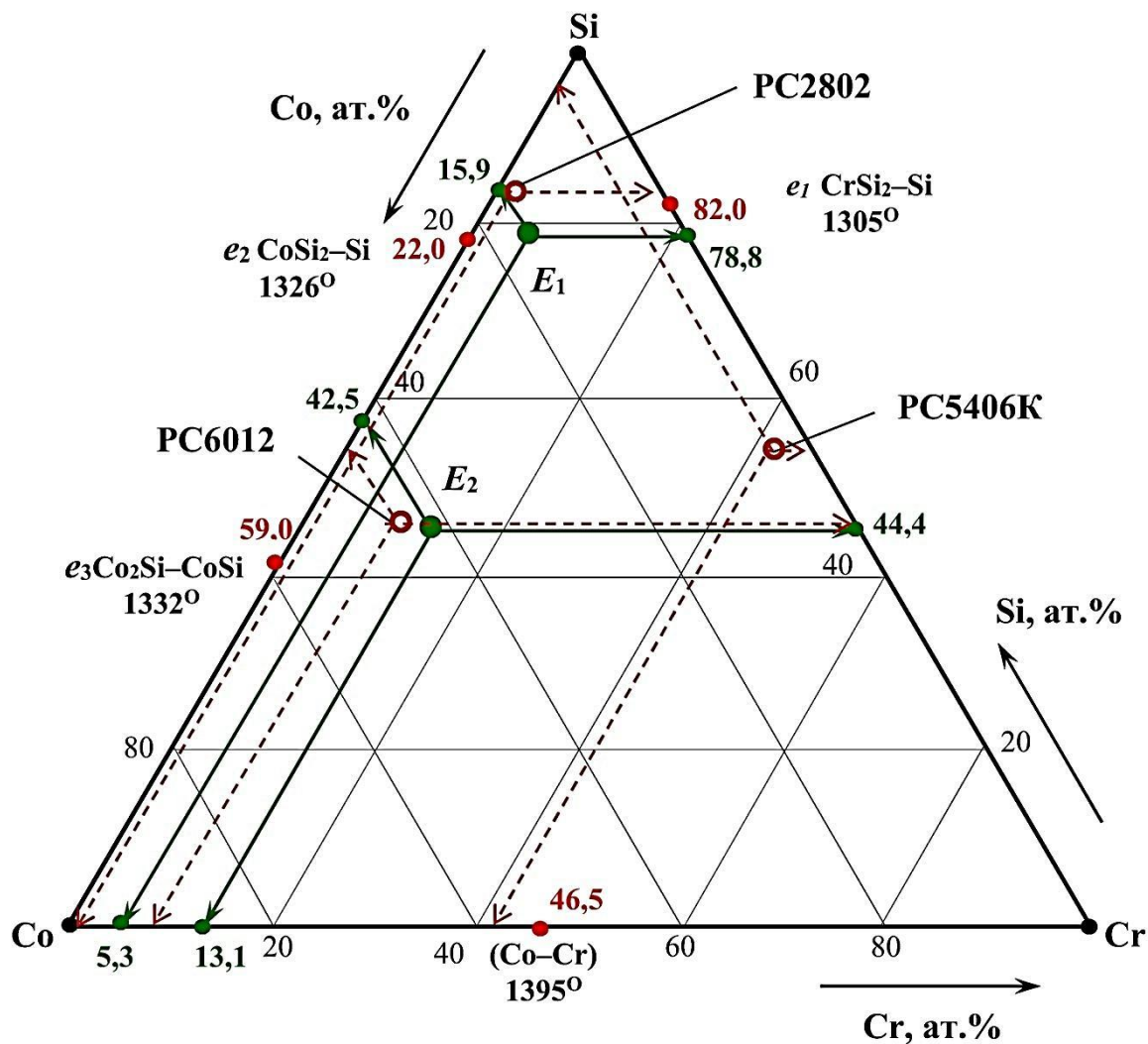
$$C^{T1}_{эвт} = 100 \times (1286 - 1230) / (2676 - 2460) = 25,9 \text{ мас. \% (CrSi-CrSi}_2\text{)}_{эвт}.$$

Концентрация (Co₂Si-CoSi)_{эвт} в тройной эвтектике составляет 74,1 мас. %. В 74,1 мас. % эвтектики Co₂Si-CoSi, состоящей из 76,2 мас.% Co и 23,8 мас. % Si, содержится 56,5 мас.

% Co и 17,6 мас. % Si. В 25,9 мас. % эвтектики CrSi–CrSi₂ состава 59,3 мас. % Cr и 40,7 мас. % Si содержится 15,4 мас. % Cr и 10,5 мас. % Si.

Таким образом, установлено, что эвтектика E_2 в тройной системе Co–Cr–Si плавится при температуре $T_{эвт} = 1230$ °С и содержит 56,5 мас. (42,5 ат.) % Co, 15,4 мас. (13,1 ат.) % Cr и 28,1 мас. (44,4 ат.) % Si.

Расположение эвтектических точек в тройной системе Co–Cr–Si представлено на рисунке.



E_1 : Co15,9 (27,4 мас.) Cr5,3 (8,1мас.) Si78,8 (64,5 мас.) ат. %, $T_{пл} = 1230$ °С
 E_2 : Co 42,5 (56,5 мас.) Cr13,1 (15,4 мас.) Si44,4 (28,1 мас.) ат. %, $T_{пл} = 1230$ °С

Рисунок – Координаты двойных (e_1 – e_3) и тройных E_1 и E_2 эвтектик в системе Co–Cr–Si, а также положения сплавов РС в ней

Как следует из рисунка, составы сплавов PC2802 и PC6012 близки к эвтектическим, поэтому вероятность получения мишеней для установок распыления из данных сплавов методом литья выше, чем у сплавов РС системы Ni–Cr–Si [2]. Для повышения трещиностойкости мишеней желательно снизить температуру их кристаллизации при литье. В работе [4] было показано, что снизить температуру плавления резистивных сплавов можно введением в них РЗМ. Установлено, что эвтектика LaSi₂–Si имеет состав: 29,65 мас. % (7,9 ат.%) La и 70,35 мас. % (92,1 ат. %) Si и плавится при 1150 °С.

2 Расчет температуры плавления высококремнистой эвтектики в системе Co–Cr–La–Si

Для расчета температуры плавления четверной эвтектики в системе Co–Cr–La–Si рассматриваем ее как состоящую из тройной эвтектики E_1 и двойной эвтектики LaSi₂–Si.

$$X_1 = (1230 - 1150) / (1230 + 1150)^{0,74} = 80/315,25 = 0,254.$$

$$K_{ЭТ1} = 0,497 \exp(-0,2657 \times 0,1047) = 0,497 / 1,0282 = 0,4645.$$

$$T_{ЭТ1} = K_{ЭТ}(T_1 + T_2) = 0,4645 \times (1230 + 1150) = 1105 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$C^1_{ЭТ} = [(T_2 - T_{ЭТ}) / (T_1 + T_2 - 2T_{ЭТ})] \times 100 \%,$$

$$C^1_{ЭТ2} = (1150 - 1105) / (1230 + 1150 - 2210) \times 100 = 26,5 \text{ мас. } \%$$

Концентрация эвтектики (LaSi₂–Si)_{ЭТ} в четверной эвтектике составляет 26,5 мас. %. В 26,5 мас. % (LaSi₂–Si)_{ЭТ} состава 29,65 мас. % La и 70,35 мас. % Si содержится 7,9 мас. % La и 18,6 мас. % Si. В 73,5 мас. % эвтектики E_1 состава 27,4 мас.% Co, 8,1 мас.% Cr и 64,5 мас. % Si содержится 19,1 мас. % Co, 6,0 мас. % Cr и 48,4 мас. % Si.

Таким образом, установлено, что четверная высококремнистая эвтектика в системе Co–Cr–La–Si плавится при температуре 1105 °С и содержит, в мас. %: Co – 19,1, Cr – 6,0, La – 7,9 и Si – 67,0.

Заключение. Показано, что составы резистивных сплавов РС2802 и РС6012 системы Co–Cr–Si близки к эвтектическим, поэтому вероятность получения мишеней для установок распыления из данных сплавов методом литья выше, чем у сплавов РС системы Ni–Cr–Si. Установлено, что рассчитанная методом Круковича температура плавления высококремнистой эвтектики в системе Co–Cr–Si равна 1230 °С и содержит 27,4 мас. (15,9 ат.) % Co, 8,1 мас. (5,3 ат.) % Cr и 64,5 мас. (78,8 ат.) % Si.

Выполнен расчет и установлено, что четверная высококремнистая эвтектика в системе Co–Cr–La–Si плавится при температуре 1105 °С и содержит, в мас. %: Co – 19,1, Cr – 6,0, La – 7,9 и Si – 67,0. Снижение температуры плавления четырехкомпонентного сплава позволит снизить вероятность растрескивание заготовок мишеней при их изготовлении методом литья.

Литература

1. ГОСТ 22025-76. Сплавы кремниевые резистивные. Технические условия.
2. Крукович М.Г. Расчет эвтектических концентраций и температуры в двух- и многокомпонентных системах / М.Г. Крукович // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 10. С. 9–17.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. Под общ. ред. Н.П.Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
4. Гладинов А.Д. Расчет концентраций и температур плавления высококремнистых эвтектик в системах РЗМ–Si / А. Д. Гладинов; науч. рук. В. А. Зеленин // Литье и металлургия 2019 [Электронный ресурс] : сборник научных работ II Международной научно-практической интернет конференции студентов и магистрантов, 16-17 октября 2019 года / ред.: А. П. Бежок, И. А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 62-63.