

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА КОМПОЗИТА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ПРИ ЗАДАННЫХ ФИЗИЧЕ- СКИХ СВОЙСТВАХ И ПЛОТНОСТИ

Л.С. КОХАН, *д-р техн. наук, профессор*

А.В. ШУЛЬГИН, *канд. техн. наук, доцент*

О.Ю. ЖИГУНОВА, *аспирантка*

*Московский государственный вечерний металлургический институт
11250, Москва, Лефортовский вал, т. 8(495)361-14-80, shulgin00@mail.ru*

В статье изложена методика определения состава композита из металлических порошков при заданных физических свойствах и плотности на примере материала «медь-цинк»

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические порошки, относительная плотность, композиционные материалы.

Применение в промышленности композиционных материалов на основе металлических порошков получило достаточно большое распространение в электротехнике, автомобилестроении, авиастроении и других отраслях.

Большое значение при изготовлении заготовок и изделий из композиционных материалов является возможность подбора концентрации компонентов с целью получения заданных физико-механических свойств композита. Для этого разработана методика подбора компонентов композиционным методом отличающаяся более высокой степенью точности по сравнению с используемыми до этого методикой смеси. Для примера ниже отработана методика определения состава электроконтакта из композитного материала «медь-цинк» для получения заданной величины удельного электросопротивления $R_{\text{зад}} = 0,035 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ и заданной относительной плотности $\bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,71$.

Приступаем к подбору концентрации компонентов из заданного удельного электросопротивления и относительной плотности.

1. Выбираем технологический маршрут изготовления электроконтакта состоящий из шихтования, горячего компактирования, спекания и горячего прессования.

2. По справочникам устанавливается сопротивление пластической деформации при горячем процессе для меди $\sigma_{\text{TМ}} = 90 \text{ МПа}$, цинка $\sigma_{\text{TЦ}} = 40 \text{ МПа}$,

удельные сопротивления меди $R_M = 0,02 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, цинка $R_{\text{Ц}} = 0,1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, показатели пористости меди $n_M = 2$, цинка $n_{\text{Ц}} = 1,8$.

3. Устанавливается общая зависимость удельного электросопротивления для различных отношений концентраций цинка и меди:

$$\frac{K_{\text{Ц}}}{K_M} = \frac{0,1}{0,9} = 0,111; \quad \frac{K_{\text{Ц}}}{K_M} = \frac{0,2}{0,8} = 0,25; \quad \frac{K_{\text{Ц}}}{K_M} = \frac{0,3}{0,7} = 0,428;$$

$$\frac{K_{\text{Ц}}}{K_M} = \frac{0,5}{0,5} = 1; \quad \frac{K_{\text{Ц}}}{K_M} = \frac{0,7}{0,3} = 2,333; \quad \frac{K}{K} = \frac{0,8}{0,2} = 4.$$

3.1. В качестве примера исследуем соотношение концентраций

$$\frac{K_{\text{Ц}}}{K_M} = \frac{0,2}{0,8} = 0,25 \text{ при } \bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,71.$$

Из условия равенства давлений между разными компонентами композита $\sigma_{\text{ТМ}} \cdot \bar{\rho}_M^{n_M} = \sigma_{\text{ТЦ}} \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}}^{n_{\text{Ц}}}$ определяется связь плотностей

$$\bar{\rho}_M = \left(\frac{\sigma_{\text{ТЦ}}}{\sigma_{\text{ТМ}}} \right)^{1/n_M} \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}}^{n_{\text{Ц}}/n_M} = 0,667 \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}}^{0,9}.$$

Линеаризуем полученную степенную функцию в уравнение $\bar{\rho}_M = A \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}} + B$. Изменяя, плотность цинка в пределах $\bar{\rho}_{\text{Ц}} = 0,6 \dots 0,95$, получим для трех точек $\bar{\rho}_{\text{Ц}} = 0,6 \dots 0,75 \dots 0,95$ по указанной степенной функции плотность меди $\bar{\rho}_M = 0,42 \dots 0,545 \dots 0,636$. Тогда для крайних значений плотностей константы линейной функции для плотности цинка определяем по зависимостям $A = \frac{0,636 - 0,42}{0,95 - 0,6} = 0,617$ и $B = 0,42 - A \cdot 0,6 = 0,05$, следовательно $\bar{\rho}_M = 0,617 \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}} + 0,05$.

Проверяем по средней точке интервала $\bar{\rho}_{\text{Ц}} = 0,75$, тогда плотность $\bar{\rho}_M = 0,513$ (отличие 5%). Далее по величине заданной плотности композита

$$\bar{\rho}_{\text{зад}} = \bar{\rho}_M \cdot K_M + \bar{\rho}_{\text{Ц}} \cdot K_{\text{Ц}} = \bar{\rho}_{\text{Ц}} \cdot K_{\text{Ц}} + (0,617 \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}} + 0,05) K_M$$

определяем плотность цинка и меди в композите

$$\bar{\rho}_{\text{Ц}} = \frac{\bar{\rho}_{\text{зад}} - 0,05 \cdot K_M}{K_{\text{Ц}} + 0,617 \cdot K_M} = \frac{0,71 - 0,05 \cdot 0,8}{0,2 + 0,617 \cdot 0,8} = 0,966; \quad \bar{\rho}_M = 0,966 \cdot 0,617 + 0,05 = 0,646.$$

Проверяем $\bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,966 \cdot 0,2 + 0,646 \cdot 0,8 = 0,71$.

С полученными результатами по предлагаемой композиционной модели удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{ком}} = R_M \cdot \bar{\rho}_M^{n_M} \cdot K_M + R_{\text{Ц}} \cdot \bar{\rho}_{\text{Ц}}^{n_{\text{Ц}}} \cdot K_{\text{Ц}} =$$

$$= 0,02 \cdot 0,646^2 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0,966^{1,8} \cdot 0,2 = 0,0265 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

По правилу смеси удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{смеси}} = R_M \cdot K_M + R_{\text{Ц}} \cdot K_{\text{Ц}} = 0,02 \cdot 0,2 + 0,646 \cdot 0,8 = 0,036 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

По эксперименту $R_{\text{экс}} = 0,027 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и отличие по композиционной теории $\Delta_{\text{ком}} = \frac{0,027 - 0,0265}{0,027} \cdot 100 = 5,5\%$, по теории смеси $\Delta_{\text{смеси}} = \frac{0,036 - 0,027}{0,036} \cdot 100 = 25\%$.

3.2. Исследуем точку с соотношением концентраций $\frac{K_{\text{ц}}}{K_{\text{м}}} = \frac{0,5}{0,5} = 1$.

Так как интервал изменения плотностей не меняется, то линеаризацию определяет та же зависимость относительных плотностей $\bar{\rho}_{\text{м}} = 0,617 \cdot \bar{\rho}_{\text{ц}} + 0,05$ и $\bar{\rho}_{\text{ц}} = \frac{\bar{\rho}_{\text{зад}} - 0,05 \cdot K_{\text{м}}}{K_{\text{ц}} + 0,617 \cdot K_{\text{м}}} = \frac{0,71 - 0,05 \cdot 0,5}{0,2 + 0,617 \cdot 0,5} = 0,847$, соответственно $\bar{\rho}_{\text{м}} = 0,573$.

Проверим $\bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,847 \cdot 0,5 + 0,573 + 0,5 \cong 0,71$. Тогда по предлагаемой композиционной модели удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{ком}} = R_{\text{м}} \cdot \bar{\rho}_{\text{м}}^{n_{\text{м}}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot \bar{\rho}_{\text{ц}}^{n_{\text{ц}}} \cdot K_{\text{ц}} = \\ = 0,02 \cdot 0,573^2 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,847^{1,8} \cdot 0,5 = 0,0403 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

По правилу смеси удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{смеси}} = R_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot K_{\text{ц}} = 0,02 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,5 = 0,06 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

По эксперименту $R_{\text{экс}} = 0,042 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и отличие по композиционной теории $\Delta_{\text{ком}} = \frac{0,042 - 0,0403}{0,042} \cdot 100 = 4,03\%$, по теории смеси $\Delta_{\text{смеси}} = \frac{0,06 - 0,042}{0,06} \cdot 100 = 30\%$.

3.3. Исследуем точку с соотношением концентраций $K_{\text{ц}}/K_{\text{м}} = 0,7/0,3 = 2,33$.

По установившейся методике находим $\bar{\rho}_{\text{ц}} = \frac{0,71 - 0,05 \cdot 0,3}{0,7 + 0,617 \cdot 0,3} = 0,783$ и $\bar{\rho}_{\text{м}} = 0,617 \cdot 0,785 + 0,05 = 0,534$.

Проверим $\bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,785 \cdot 0,7 + 0,534 + 0,3 \cong 0,71$. Тогда по предлагаемой композиционной модели удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{ком}} = R_{\text{м}} \cdot \bar{\rho}_{\text{м}}^{n_{\text{м}}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot \bar{\rho}_{\text{ц}}^{n_{\text{ц}}} \cdot K_{\text{ц}} = \\ = 0,02 \cdot 0,534^2 \cdot 0,3 + 0,1 \cdot 0,785^{1,8} \cdot 0,7 = 0,047 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

По правилу смеси удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{смеси}} = R_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot K_{\text{ц}} = 0,02 \cdot 0,3 + 0,1 \cdot 0,7 = 0,076 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

По эксперименту $R_{\text{экс}} = 0,049 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и отличие по композиционной теории $\Delta_{\text{ком}} = \frac{0,049 - 0,047}{0,049} \cdot 100 = 4,1\%$, по теории смеси $\Delta_{\text{смеси}} = \frac{0,76 - 0,049}{0,076} \cdot 100 = 35,5\%$.

3.4. Исследуем точку с соотношением концентраций $K_{\text{ц}}/K_{\text{м}} = 0,8/0,2 = 4$.

По установившейся методике $\bar{\rho}_{\text{ц}} = \frac{0,71 - 0,05 \cdot 0,2}{0,8 + 0,617 \cdot 0,2} = 0,758$ и $\bar{\rho}_{\text{м}} = 0,758 \cdot 0,617 + 0,05 = 0,528$.

Проверим $\bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,758 \cdot 0,8 + 0,518 + 0,2 \cong 0,71$. Тогда по предлагаемой композиционной модели удельное электросопротивление будет равно:

$$\begin{aligned} R_{\text{ком}} &= R_{\text{м}} \cdot \bar{\rho}_{\text{м}}^{n_{\text{м}}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot \bar{\rho}_{\text{ц}}^{n_{\text{ц}}} \cdot K_{\text{ц}} = \\ &= 0,02 \cdot 0,518^2 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,758^{1,8} \cdot 0,8 = 0,0496 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}. \end{aligned}$$

По правилу смеси электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{смеси}} = R_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot K_{\text{ц}} = 0,02 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,8 = 0,084 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

По эксперименту $R_{\text{экс}} = 0,052 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и отличие по композиционной теории $\Delta_{\text{ком}} = \frac{0,052 - 0,0496}{0,052} \cdot 100 = 4,6\%$, по теории смеси $\Delta_{\text{смеси}} = \frac{0,84 - 0,052}{0,084} \cdot 100 = 38\%$.

Полученные результаты расчетов представлены на графике зависимости удельного электросопротивления от состава композита рис. 1.

4. Выбор состава композита по заданному удельному электросопротивлению $R_{\text{зад}} = 0,035 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

По графику на рис. 1 для $R_{\text{зад}}$ устанавливается отношение $K_{\text{ц}}/K_{\text{м}} = 0,57$. Учитывая, что $K_{\text{ц}} + K_{\text{м}} = 1$ определяем концентрацию меди в композите

$$K_{\text{м}} \left(1 + \frac{K_{\text{ц}}}{K_{\text{м}}} \right) = 1, \text{ следовательно } K_{\text{м}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{\text{ц}}}{K_{\text{м}}}} = \frac{1}{1,57} = 0,637 \text{ и } K_{\text{ц}} = 0,363.$$

Получим относительные плотности каждого из компонентов композита:

$$\bar{\rho}_{\text{ц}} = \frac{\bar{\rho}_{\text{зад}} - 0,05 \cdot K_{\text{м}}}{K_{\text{ц}} + 0,617 \cdot K_{\text{м}}} = \frac{0,71 - 0,05 \cdot 0,637}{0,363 + 0,617 \cdot 0,637} = 0,897;$$

$$\bar{\rho} = 0,617 \cdot \bar{\rho}_{\text{ц}} + 0,05 = 0,617 \cdot 0,897 + 0,05 = 0,603.$$

Проверим $\bar{\rho}_{\text{зад}} = 0,897 \cdot 0,363 + 0,603 + 0,637 \cong 0,71$. Тогда по предлагаемой композиционной модели удельное электросопротивление будет равно:

$$\begin{aligned} R_{\text{ком}} &= R_{\text{м}} \cdot \bar{\rho}_{\text{м}}^{n_{\text{м}}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot \bar{\rho}_{\text{ц}}^{n_{\text{ц}}} \cdot K_{\text{ц}} = \\ &= 0,02 \cdot 0,603^2 \cdot 0,637 + 0,1 \cdot 0,897^{1,8} \cdot 0,363 = 0,0345 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}. \end{aligned}$$

По правилу смеси удельное электросопротивление будет равно:

$$R_{\text{смеси}} = R_{\text{м}} \cdot K_{\text{м}} + R_{\text{ц}} \cdot K_{\text{ц}} = 0,02 \cdot 0,637 + 0,1 \cdot 0,363 = 0,049 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Отличие от $R_{\text{зад}}$ по композиционной теории $\Delta_{\text{ком}} = \frac{0,035 - 0,0345}{0,035} \cdot 100 = 1,4\%$,

тогда как по теории смеси $\Delta_{\text{смеси}} = \frac{0,049 - 0,035}{0,049} \cdot 100 = 28,57\%$.

Использование предложенной методики позволяет значительно повысить точность определения концентраций компонентов в композиционном материале

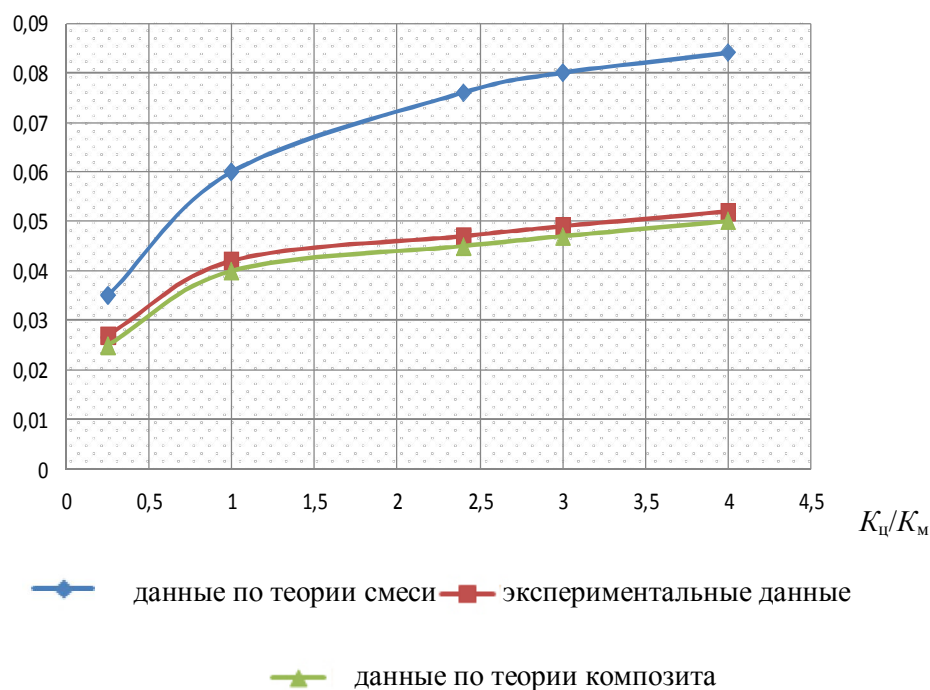


Рис. 1. График зависимости удельного электросопротивления от состава композита

на основе металлических порошков, что приводит к существенному сокращению расходов на изготовления конкретной продукции с заданными свойствами.

Л и т е р а т у р а

1. Кохан Л.С., Роберов И.Г., Линчевский Б.В., Шульгин А.В. Исследования процесса компактирования одно- и двухкомпонентных металлических порошков// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – М.: МИСиС, 2007. – Вып. 9. – С. 26-28.
2. Kokhan L.S., Shulgin A.V., Semenova L.M. Physic-Mechanical Properties of an Iron–Copper–Zinc Composite// Metallurgist. – 2010. – Vol. 54, Numbers 7-8. – PP. 468-471.
3. Кохан Л.С., Шульгин А.В. Новое в теории формообразования композиционных порошковых материалов – М.: МГВМИ, 2011, 20 с.

References

1. Kohan, L.S., Roberov, I.G., Linchevskij, B.V., Shul'gin, A.V. (2007). Issledovanija processa kompaktirovanija odno- i dvuhkomponentnyh metallicheskih poroshkov, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, Moscow: MISiS, Vip. 9, 26-28.
2. Kokhan, L.S., Shulgin, A.V., Semenova, L.M. (2010). Physico-Mechanical Properties of an Iron–Copper–Zinc Composite, *Metallurgist*, Vol. 54, Numbers 7-8, 468-471.
3. Kohan L.S., Shul'gin A.V. (2011). *Novoe v teorii formoobrazovanija kompozicionnyh poroshkovyh materialov*, Moscow: MGVMI, 20 p.

THE DEFINITION TECHNIQUE OF AGGREGATE COMPOSITION FROM METAL DUSTS WITH THE SET PHYSICAL PROPERTIES AND DENSITY

L.S. Kohan, A.V. Shulgin, O.Yu. Zhigunova
 Moscow State Night Institute, Moscow

The definition technique of aggregate composition from metal dusts with the set physical properties and density is stated in the paper with "cuprum-zinc" example.

KEY WORDS: metal powder, relative density, composite materials.