

Теперь можем использовать формулу для определения  $\rho_c$ :

$$\ln \rho_c = \frac{(y_c + y_n) \ln \rho_{cn} - y_n \ln \rho_n}{y_c} \quad (7)$$

Результаты расчета  $\rho_n$  и  $\rho_c$  приведены в табл. 3.

На рис. 3 для сопоставления электросопротивления стекла и пор приведена зависимость отношения  $\rho_n/\rho_c$  от  $y_n$ .

Рассчитанные значения  $\rho_c$  и  $\rho_n$  позволяют определить величину электросопротивления СКМ при разных объемных концентрациях стекла, наполнителя и пор по формуле (3). Результаты этих расчетов, как и следовало ожидать, получаются такими же, что и при расчете по формуле [3, (25)] (табл. 3, рис. 4 и 5).

Найденные значения  $\rho_n$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_n$  позволяют оценить их влияние на электросопротивление СКМ.

При расчете электросопротивления компонентов на основе формул (1) и (2) получены величины на несколько порядков выше экспериментальных. Это связано с тем, что критерием применимости теорий Ландау и Лифшица и Баера является не слишком большое отличие параметров компонентов друг от друга, что для электросопротивления СКМ оказалось невыполнимым ( $\rho_n$  на несколько порядков превышает  $\rho_c$  и  $\rho_n$ ).

**Выводы.** Зависимость величины электросопротивления СКМ, стекла и стекла с порами от объемного содержания пор носит качественно одинаковый характер: относительно малый темп их уменьшения в области значений  $y_n$  0,03...0,42 и резкое увеличение (на несколько порядков) при уменьшении  $y_n$  от 0,03 до 0 (табл. 1 и 3, рис. 3 и 4). Их изменение во всем диапазоне  $y_n$  достигает пяти порядков. По-видимому, такой характер изменения  $\rho$  объясняется шунтирующим влиянием стекла и пор с малым электросопротивлением в области больших значений  $y_n$  и резким нарастанием электросопротивления стекла при  $y_n < 0,03$  (табл. 3). Такой переломный характер изменения  $\rho$ ,  $\rho_c$  и  $\rho_{cn}$  вблизи  $y_n \approx 0,03$ , очевидно, связан с тем, что соответствующая этой пористости температура  $t_{cn}^0 \approx 760^\circ\text{C}$  является так называемой температурой «лужи», выше которой стекло становится маловязким, легко растекается и образует стеклянную матрицу в СКМ (температура начала размягчения стекла С51-1 составляет  $570 \pm 15^\circ\text{C}$ ).

В зависимости  $\rho_n/\rho_c(y_n)$  (рис. 3) наблюдаются две граничные области:  $y_n > 0,3$ , в которой  $\rho_c < \rho_n$ , и  $y_n < 0,3$ , в которой  $\rho_c > \rho_n$  (при  $y_n \approx 0,3$   $\rho_c = \rho_n$ ). Это согласуется с соотношением тангенса угла диэлектрических потерь в стекле и порах:  $\text{tg} \delta_c > \text{tg} \delta_n$  при  $y_n > 0,3$ ;  $\text{tg} \delta_c < \text{tg} \delta_n$  при  $y_n < 0,3$  и  $\text{tg} \delta_c = \text{tg} \delta_n$  при  $y_n = 0,3$  [4]. Такие соотношения  $\rho$  и  $\text{tg} \delta$  в стекле и порах, по-видимому, связаны с переходом одной фазы спекания в другую: при  $y_n > 0,3$  усадка СКМ происходит в основном за счет исключения крупных незамкнутых пор с одними параметрами, а при  $y_n < 0,3$  — за счет формирования и ухода из СКМ замкнутых пор с отличающимися параметрами.

Во всем диапазоне изменения  $y_n$  большему содержанию стекла соответствует меньшая величина  $\rho$  СКМ за счет того, что  $\rho_c \ll \rho_n$  (рис. 4).

Повышение объемной доли стекла в 1,76 раза для всех значений  $y_n$  приводит к снижению электросопротивления композита более, чем на порядок (рис. 5, табл. 4). Это происходит также за счет того, что  $\rho_c \ll \rho_n$ . Снижение минимально при  $y_n = 0$  (примерно в 15 раз) и максимально при  $y_n = 0,028$  (примерно в 540 раз). Такое различие объясняется тем, что по-разному изменяются величины  $\rho_n$  и  $\rho_c$  (табл. 3). Кроме того, с ростом  $y_n$  уменьшается количество наполнителя, влияющего на  $\rho$  СКМ.

Поскольку  $\rho_n \gg \rho_c$  и  $\rho_n \gg \rho_n$ , присутствие наполнителя увеличивает удельное объемное электросопротивление СКМ по сравнению с электросопротивлением компонентов. Мерой проявления такого влияния может служить отношение  $\rho/\rho_c$ . Большей величине этого соотношения соответствует большее влияние наполнителя на электросопротивление СКМ.

Для оценки эффективности введения в СКМ функционального наполнителя ГН-1 было рассчитано отношение  $\rho/\rho_c$  для разных  $y_c/y_n$ , найденных по данным табл. 4. Результаты расчета приведены на рис. 6.

Заметим, что для СКМ с одинаковым массовым содержанием стекла отношение  $y_c/y_n$  одинаково для разных значений  $y_n$  и составляет: для  $m_c = 0,80$  — 5,60; для  $m_c = 0,50$  — 1,40; для  $m_c = 0,45$  — 1,14; для  $m_c = 0,40$  — 0,93. С увеличением  $m_c$  растет отношение  $y_c/y_n$ . Это приводит к снижению эффективности введения наполнителя в СКМ. Поэтому отношения  $\rho/\rho_c$  становятся ниже во всем диапазоне  $y_n$ .

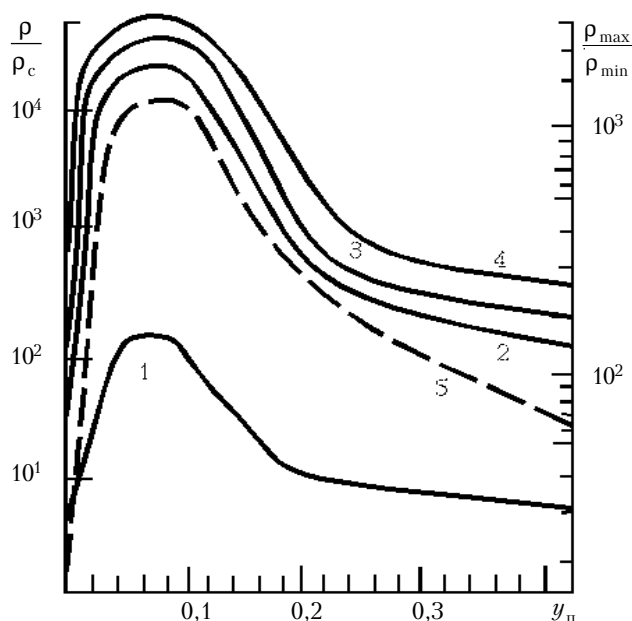


Рис. 6. Зависимость отношения  $\rho/\rho_c$  от объемной концентрации пор для разных значений  $y_c/y_n$ : 5,6 (1); 1,4 (2); 1,14 (3); 0,93 (4);  $\rho_{\max}/\rho_{\min}$  (5)

Влияние величины  $y_n$  проявляется по-разному в области концентрации  $y_n \approx 0,07$ . Здесь увеличение  $y_n$  приводит к снижению  $\rho/\rho_c$ , поскольку при этом уменьшается доля наполнителя  $y_n$ , и величина  $\rho$  уменьшается за счет большего содержания пор с малым электросопротивлением. Появление спада  $\rho/\rho_c$  при уменьшении  $y_n$  от 0,07 обусловлено более резким нарастанием  $\rho_c$  (на несколько порядков при уменьшении  $y_n$  до нуля). Наибольшая эффективность от введения в СКМ наполнителя наблюдается в области экстремума при  $y_n \approx 0,07$ . При этом  $\rho_c$  еще не достигает своего максимального значения. В важном для практики случае, когда  $y_n = 0$  и объемная концентрация  $y_n$  высока (в нашем случае  $y_c/y_n = 0,93$ ), удельное объемное электросопротивление СКМ по сравнению со стеклом увеличивается приблизительно в 45 раз (рис. 6, табл. 4). Это достигается не только введением наполнителя, но также и за счет отсутствия пор, электросопротивление которых на несколько порядков ниже, чем у наполнителя.

Аналогичный характер (с экстремумом вблизи  $y_n \approx 0,07$ ) носит и зависимость отношений  $\rho_{\max}/\rho_{\min}$  от  $y_n$ , вычисленных из концентрационных зависимостей на рис. 5 для разных значений  $y_n$  (рис. 6, кривая 5). Наблюдаемый спад в области  $y_n > 0,07$  объясняется характером зависимостей  $\rho(y_c)$  на рис. 5.

Предложенный способ выполнения расчета  $\rho_c$ ,  $\rho_n$  и  $\rho_n$  по величине электросопротивления СКМ при разных концентрациях компонентов и пор мо-

жет применяться для СКМ с большим количеством компонентов, а также для расчетов с учетом структурных параметров.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Новиков В. В., Дмитриев М. В., Шаповалов И. П., Тартаковская Л. Н. Определение эффективных диэлектрических свойств стеклокерамики с учетом структурных параметров // Техника средств связи. Сер. Технология производства и конструирование. — 1987. — Вып. 3. — С. 48—59.
2. Новиков В. В., Тартаковская Л. Н., Тризна Ю. П. и др. Диэлектрические свойства наполненного стеклокерамического материала // Инж.-физ. журнал. — 1990. — Т. 29, № 6. — С. 962—968.
3. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 4. — С. 34—38.
4. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрические потери в стеклокерамике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1998. — № 1. — С. 39—43.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — М.: ГИТТЛ, 1957.
6. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. — М.: Энергоиздат, 1982.
7. Lichteneker K., Rother K. Die herleitung des logarithmischen mischungsgesetzes des allgemeinen prinzipien der stationaren stromung // Physikalische zeitschrift. — 1931. — N 6. — S. 3225—3267.
8. Балкевич В. Л. Техническая керамика. — М.: Стройиздат, 1984.

## ПРИПОЙНЫЕ ПАСТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГРУППОВОЙ ПАЙКИ

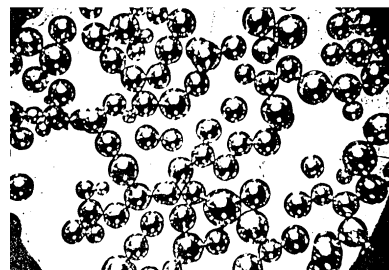
### В зависимости от типа флюс-связующего:

- ♦ **безотмывочные припойные пасты** (остатки после оплавления не требуют отмывки, поскольку представляют собой твердый некоррозионноактивный диэлектрик);
- ♦ **водоотмываемые пасты** (остатки после оплавления легко удаляются водой);
- ♦ **пасты для специальных применений** (высокая активность, длительное время хранения, остатки после оплавления удаляются спирто-бензиновой смесью).

**Порошкообразный припой** изготавливается из любого низкотемпературного припоя с температурой плавления до 250°C. Зерна припоя не окислены, имеют сферическую форму, при хранении не требуют специальной защиты от окисления.

*Для расширения технологических возможностей могут поставляться раздельно.*

*Параметры паст подгоняются под определенный технологический процесс.*



Украина, 270021, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1,  
Украинская государственная академия связи (УГАС) им. А. С. Попова.  
Тел. (0482) 207-883, 248-869, факс (0482) 236-118.