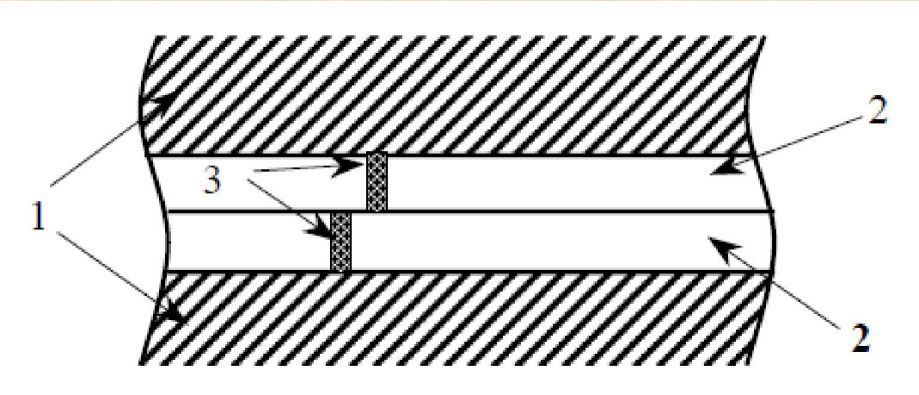
# Совместимость материалов

**Под совместимостью понимается свойство системы из различных ЭИМ совместно работать в определенных условиях эксплуатации и в определенных конструкциях без взаимного или одностороннего отрицательного воздействия, снижающего качество конструкции в целом.**

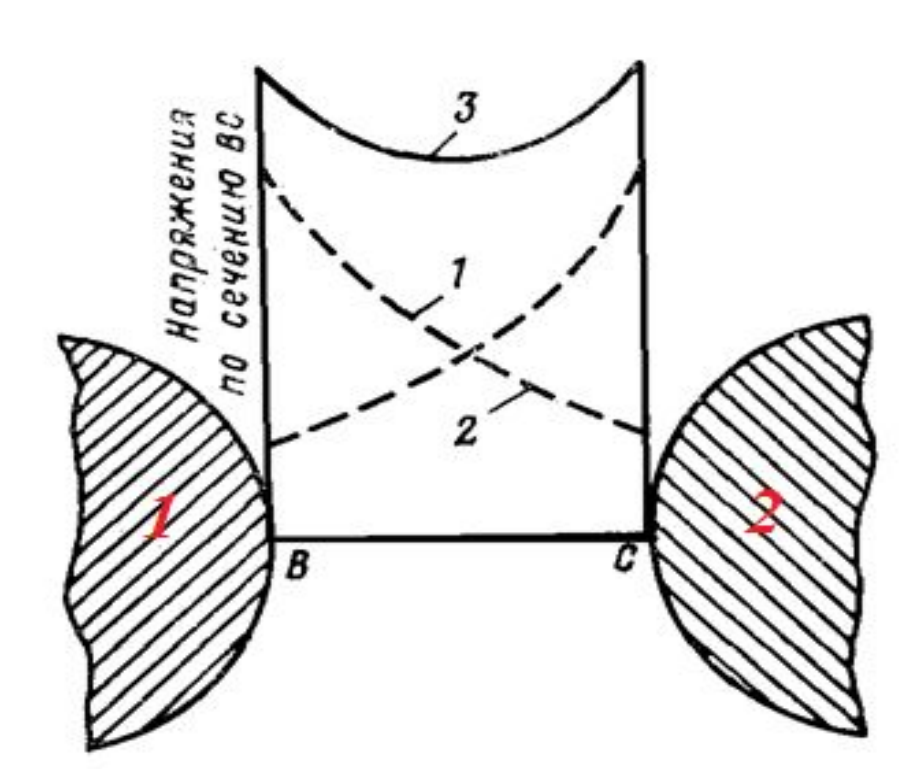
1) Технологическая совместимость – способность пленки эмалевого провода сохранять электрические и механические свойства после действия растворителя и горячих пропиточных составов.

2) Эксплуатационная совместимость – способность эмалевой изоляции и пропиточного состава совместно работать в одной системе без ускоренного износа.




**Физическая модель низковольтной межвитковой изоляции**

1 – провод; 2 – эмалевая изоляция; 3 – сквозное повреждение эмали




**Эффект взаимного влияния проводников**

1 — кривая распределения внутренних напряжений от проводника 1; 2 — кривая распределения напряжений от проводника 2;

3 — суммарная кривая

- **Для одноосного растяжения** (полимер в устройствах продолговатой формы, трубки, пазы и т.п.)

$$\sigma_{вн} = -(\alpha_п - \alpha_м)\Delta T \cdot E,$$

- где $\alpha_м$ – ТКЛР металла;
  $\alpha_п$ и $E$ – ТКЛР и модуль упругости полимерного материала;
  $\Delta T$ – разность наименьшей эксплуатационной температуры $T_э$ и температуры стеклования – $T_с$ ($T_э - T_с$).
  · **Для двухосного растяжения** (тонкие слои, нанесенные на твердые подложки – эмаль в лобовых частях, лаковые покрытия)

$$\sigma_{вн} = -\frac{(\alpha_п - \alpha_м)\Delta T \cdot E}{1-\mu},$$

- где $\mu$ - коэффициент Пуассона полимерного материала.
  .
  Для резин $\mu$ = 0,5 (мм/мм), стали $\mu$ = 0,3 (мм/мм).
- · **Для трехосного нагружения** (толстые слои полимерных материалов)

$$\sigma_{вн} = -\frac{(\alpha_п - \alpha_м)\Delta T \cdot E}{1-2\mu},$$

- 
- где величина $\mu$ для высокоэластичного состояния – 0,45; для стеклообразного – 0,33.

При оценке совместимости системы необходимо учитывать

1. **соотношение распределений** прочности на растяжение пропитывающего состава $\sigma_р$ и внутреннего напряжения $\sigma_{вн}$.

Дефект образуется, если происходит пересечение функций распределений этих величин ($\sigma_{вн\ max} > \sigma_{р\ min}$). Вероятность образования дефекта пропорциональна заштрихованной площади под пересекающимися кривыми.

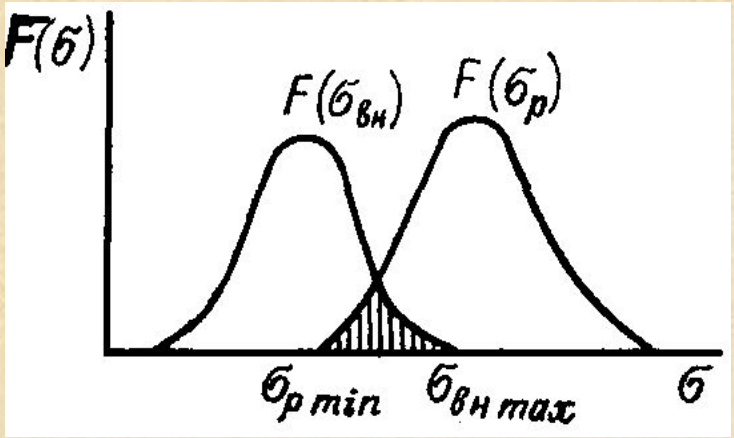


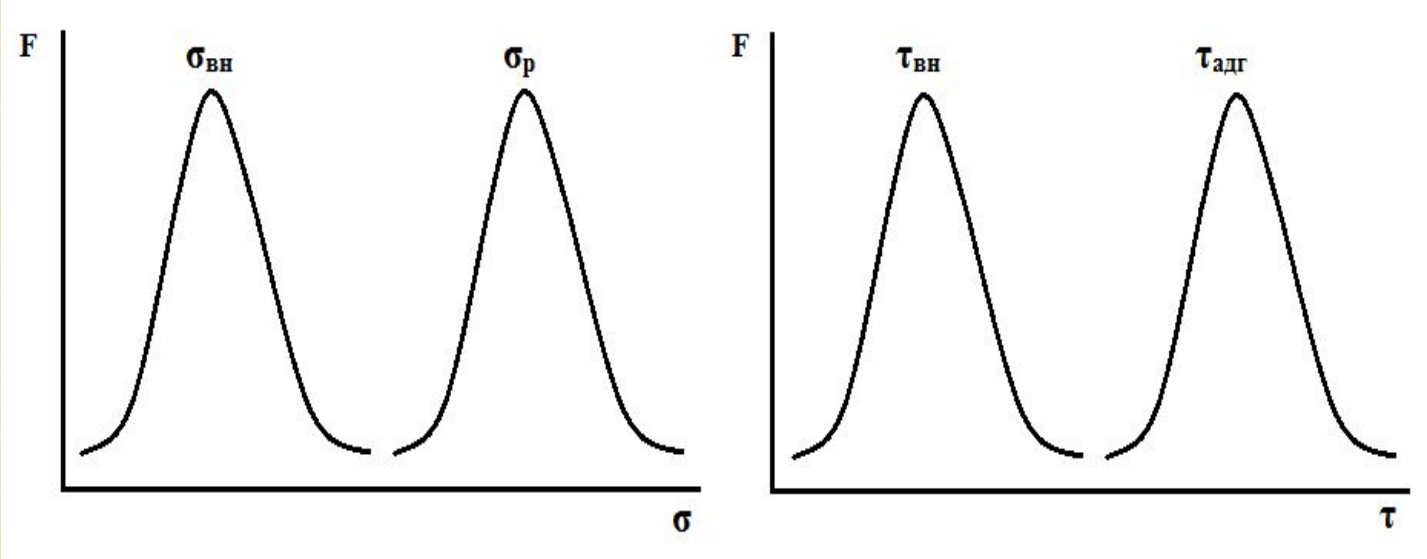

**График зависимости *F=f(σ)***

2. **соотношение тангенциальной составляющей внутренних напряжений $\tau_{вн}$** и адгезионной прочности эмали $\tau_а$. Отслоение пропиточного материала от эмали произойдет, если $\tau_{вн} \geq \tau_а$.

$$E_э < E_{п.с},$$

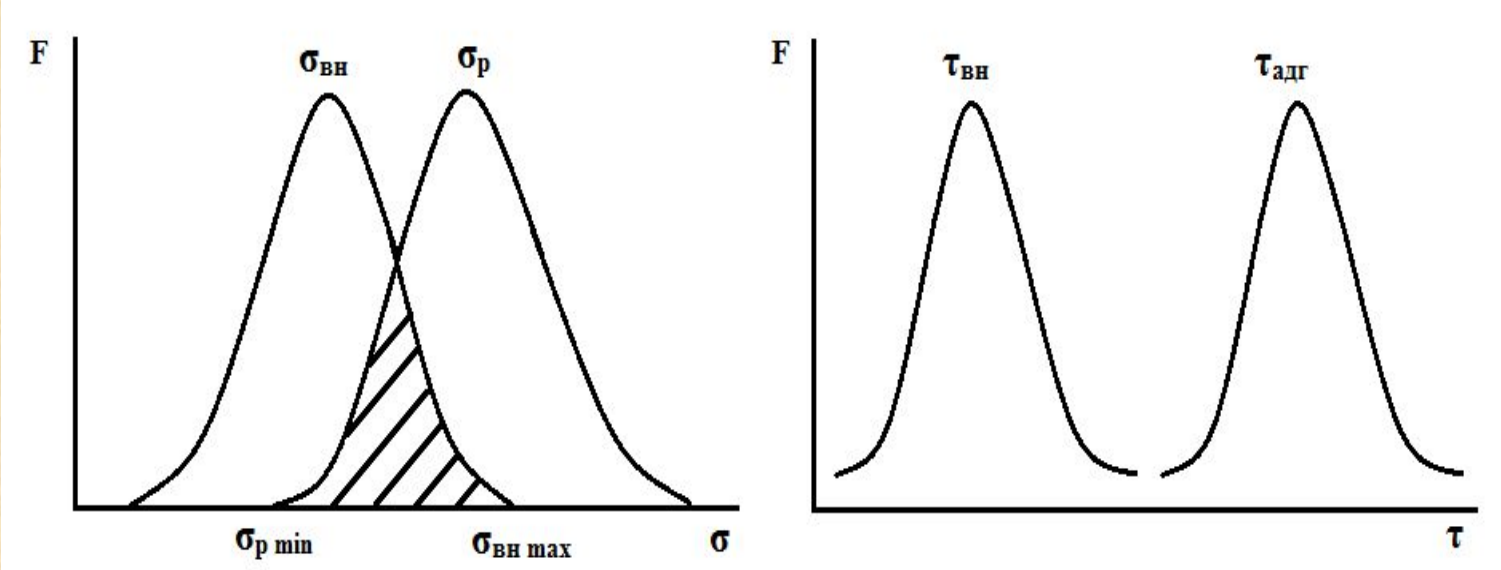
**1. Совместимая система, не подверженная растрескиванию и расслоению**

$\sigma_{р\ min} > \sigma_{вн\ max}$ (нет заштрихованной площади) и $\tau_{вн\ max} < \tau_{а\ min}$ (нет заштрихованной площади)



## 2. Растрескивание и снижение $U_{пр}$ изоляции

$\sigma_{р\ min} < \sigma_{вн\ max}$ (есть заштрихованная площадь) и $\tau_{вн\ max} < \tau_{а\ min}$ (нет заштрихованной площади)



**3. Отслоение эмали, ухудшение цементации витков** *($U_{пр}$* может не измениться)

3) $\sigma_{p\ min} < \sigma_{вн\ max}$ (есть заштрихованная площадь) и $\tau_{вн\ max} > \tau_{a\ min}$ (есть заштрихованная площадь)

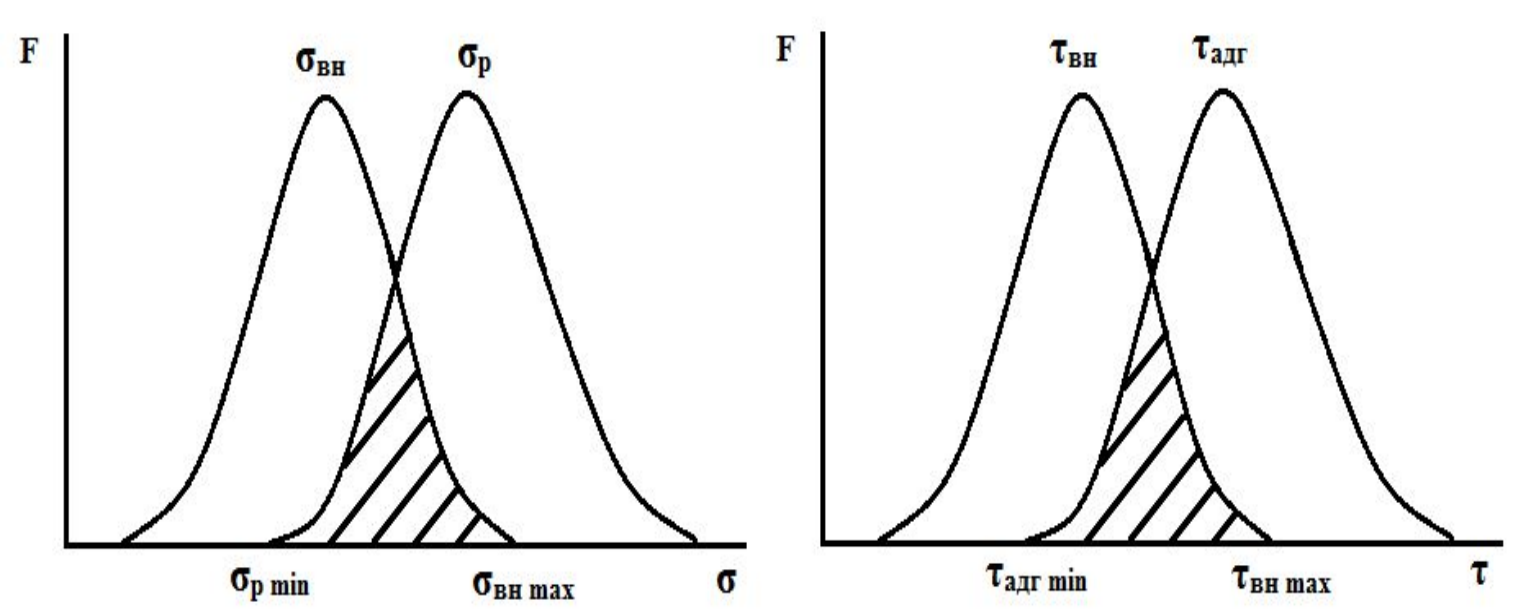



**График зависимости *F=f(σ)* и *F=f(τ)***

$$E_э > E_{п.с}$$

3) $\sigma_{р\ min} < \sigma_{вн\ max}$ (есть заштрихованная площадь) и $\tau_{вн\ max} > \tau_{а\ min}$ (есть заштрихованная площадь)

- Аналитический срок службы по адгезии

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma}{kT}\right),$$

где $\tau$ – срок службы при заданной температуре;

$\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-13}$ $c$ – константа (период колебаний атомов);

$u_0$ – энергия активации разрушения адгезионной связи, Дж/моль;

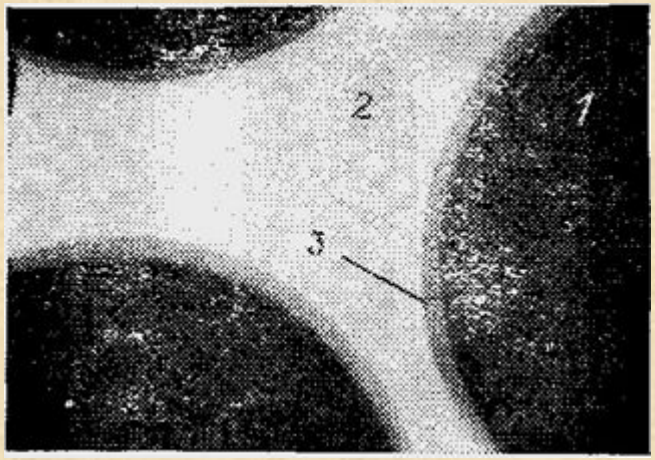
$\gamma$ – безразмерная величина, зависящая от граничного слоя полимера, прилегающего к субстрату, и толщины полимерной пленки;

$\sigma$ – внутренние напряжения в полимере, МПа.

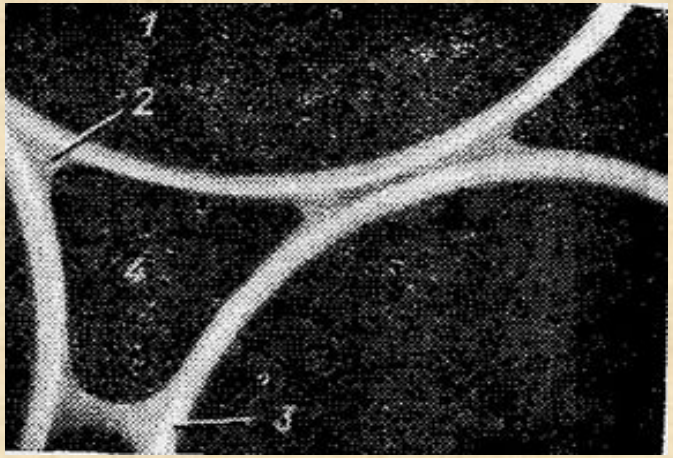
# Микро конструкция межвитковой изоляции

монолитная – при полном заполнении межвиткового пространства пропиточным материалом

сотовая – пропиточный состав располагается в виде тонкой пленки вокруг провода

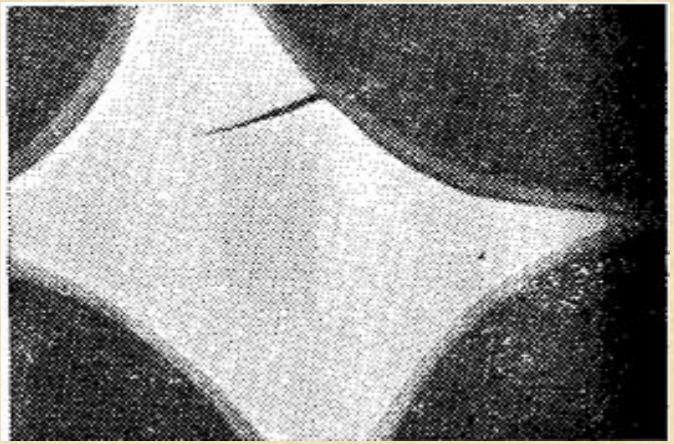



**Монолитная конструкция межвитковой изоляции**
1 – провода; 2 – пропиточный компаунд; 3 – пленка эмали на проводе

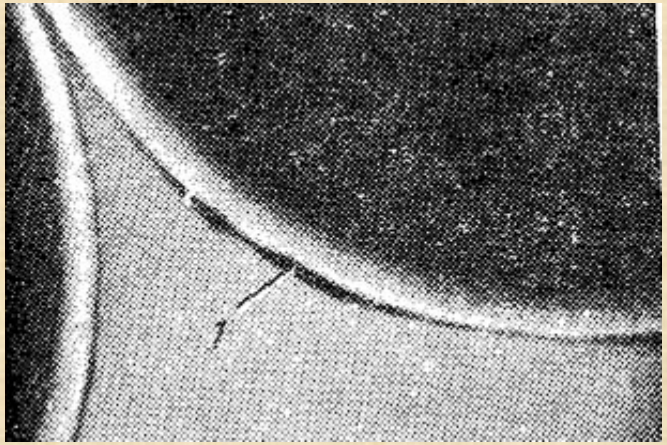



**Сотовая конструкция межвитковой изоляции**
1 – провода; 2 – пропиточный материал; 3 – пленка эмали на проводе; 4 – полость, не заполненная лаком

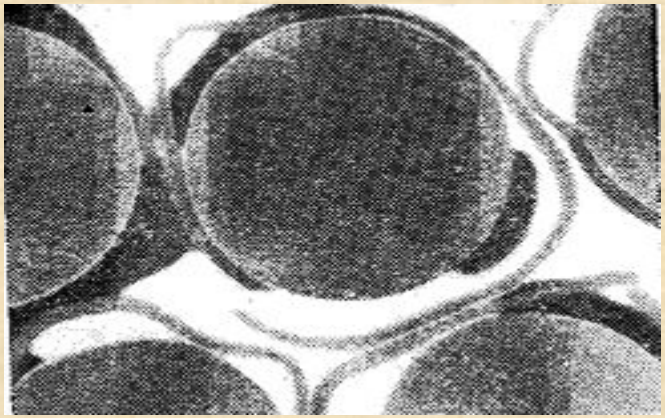
**Несовместимые системы**.



**Трещина, прорастающая в центральную область межвитковой изоляции**



**Отслоение пропиточного материала от эмали**
1 – область отслоения



**Вид разрушений конструкции изоляции из химически несовместимых материалов**
провод ПЭТ-155 пропитан эпоксидным компаундом с отвердителем изо-МТГФА

# Оценка совместимости

# Химическая совместимость

Воздействие пропиточных материалов и растворителей на пленку эмали характеризуется следующими показателями:

1) размягчение эмали

2) изменение пробивного напряжения после запечки пропиточного материала

3) изменение нагревостойкости пропитанных образцов по сравнению с непропитанными

| Марка провода | В исходном состоянии (без растворителя) | Твердость карандаша* для растворителя | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Ацетон | Уайт-спирит | Толуол | Этиловый спирт |
| ПЭТВ | 3Н | 2В | 3Н | 2Н | Н |
| ПЭТ-155 | 3Н | 3В | 3Н | 3Н | 2Н |
| ПЭТ-200 | 7Н | 4Н | 6Н | 6Н | 5Н |
| ПНЭТ-имид | 2Н | 2Н | 2Н | 2Н | 2Н |

* 7Н – наиболее твердый карандаш, 6В - наиболее мягкий

## Изменение пробивного напряжения изоляции эмалированных проводов при воздействии растворителей

| Растворитель | Среднее пробивное напряжение для проводов, кВ | |
|---|---|---|
| | ПЭТВ | ПЭТ-155 |
| Без растворителя | 8,5 | 5,1 |
| Толуол | 8,4 | 4,6 |
| Уайт-спирит | 8,1 | 5,3 |
| Ацетон | 7,1 | 4,8 |

## Стойкость изоляции эмалированных проводов к пропиточным лакам

| Марка провода | Твердость карандаша | | |
|---|---|---|---|
| | В исходном состоянии | После воздействия пропитывающего состава | |
| | | лак ПЭ-933 | компаунд КП-34 |
| ПЭВТ | 3Н | НВ | 2Н |
| ПЭТ-155 | 3Н | 3Н | 3Н |
| ПЭТ-200 | 7Н | 7Н | 6Н |
| ПНЭТ-имид | 2Н | 2Н | 2Н |

# Физическая совместимость

**ТГМ индексы систем эмалированный провод - пропиточный материал**
(в скобках показаны ТГМ – индексы пропиточного лака и пленки эмали обмоточных проводов)

| Пропиточный лак | Изоляция обмоточного провода | | | |
|---|---|---|---|---|
| | полиимидная (236) | поли-амидимидная (215) | полиэфирная с амидимидным покрытием (169) | полиэфирная с нейлоновым покрытием (161) |
| Фенольный (208) | 200 | 200 | 200 | 162 |
| Кремнийорганический (195) | 177 | 178 | 168 | 163 |