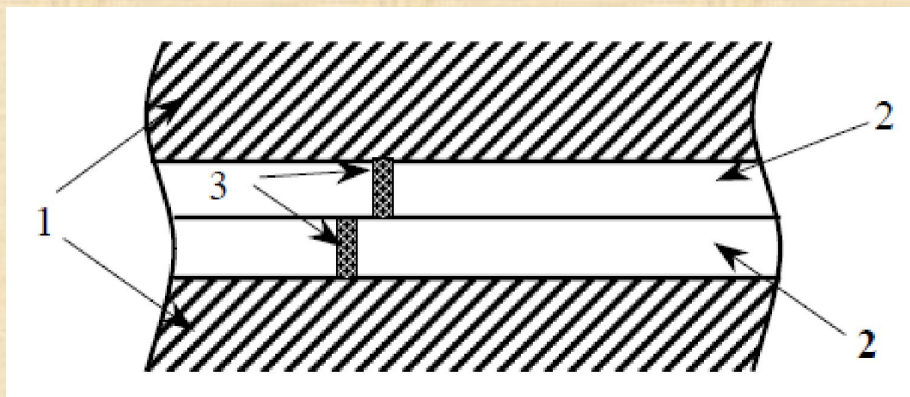


Совместимость материалов

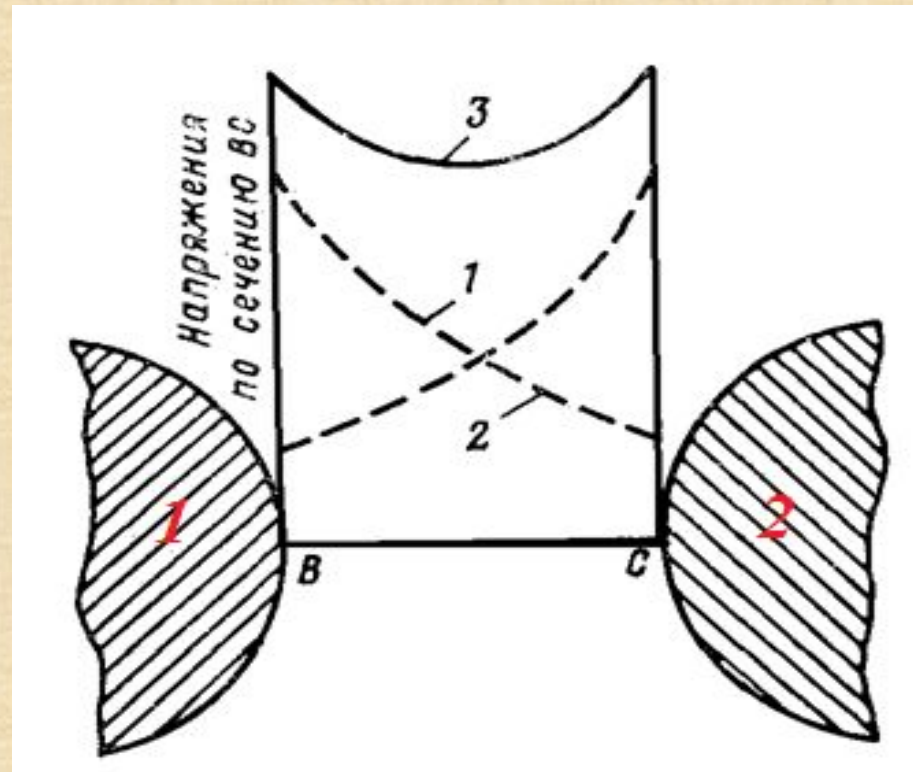
Под совместимостью понимается свойство системы из различных ЭИМ совместно работать в определенных условиях эксплуатации и в определенных конструкциях без взаимного или одностороннего отрицательного воздействия, снижающего качество конструкции в целом.

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.)

$$\sigma_{вн} = -(\alpha_n - \alpha_m)\Delta T \cdot E,$$

- где α_m – ТКЛР металла;
 α_n и E – ТКЛР и модуль упругости полимерного материала;
 ΔT – разность наименьшей эксплуатационной температуры $T_э$ и температуры стеклования – T_c ($T_э - T_c$).
- **Для двухосного растяжения** (тонкие слои, нанесенные на твердые подложки – эмаль в лобовых частях, лаковые покрытия)

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

- где μ - коэффициент Пуассона полимерного материала.

Для резин $\mu = 0,5$ (мм/мм), стали $\mu = 0,3$ (мм/мм).

- **Для трехосного нагружения** (толстые слои полимерных материалов)

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

- где величина μ для высокоэластичного состояния – 0,45; для стеклообразного – 0,33.

При оценке совместимости системы необходимо учитывать

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

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

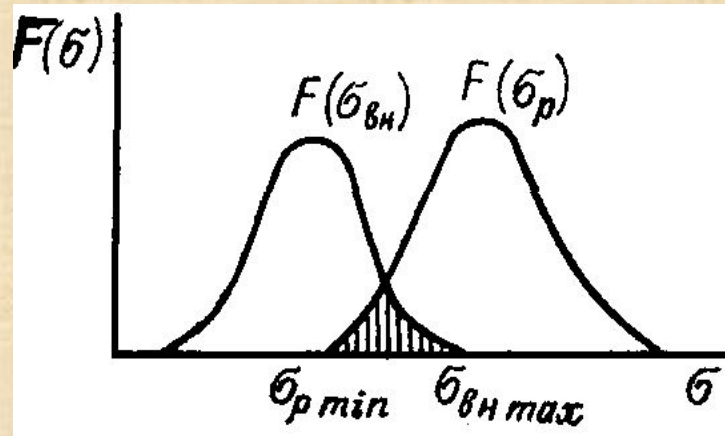


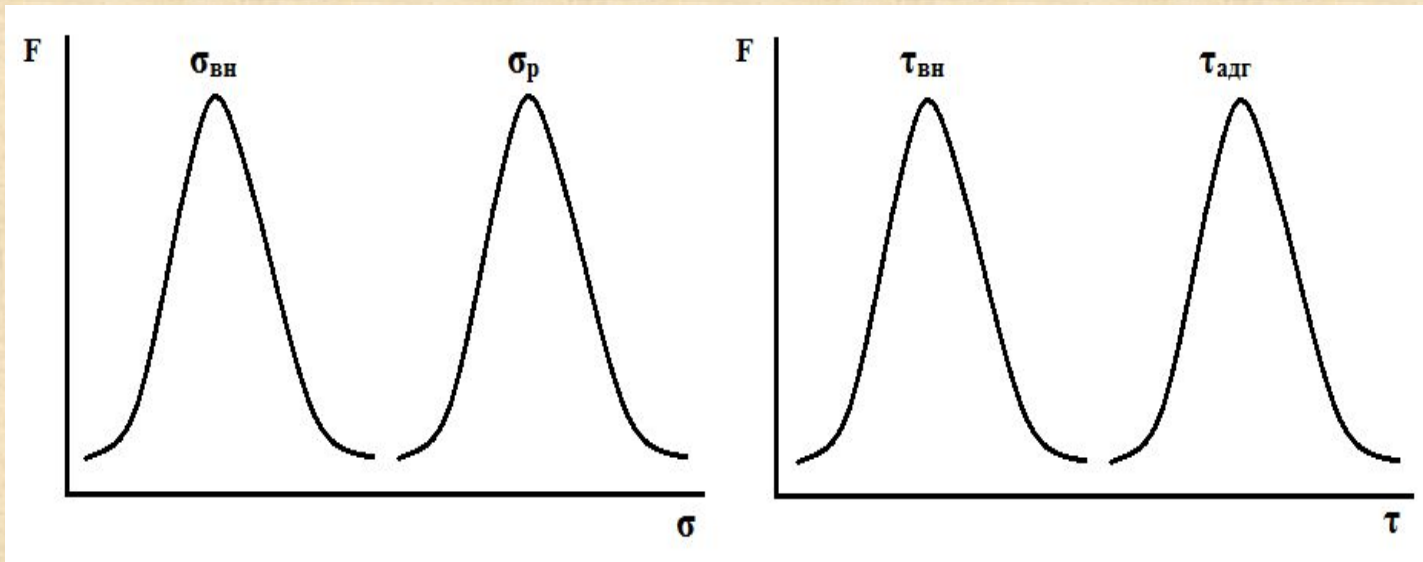
График зависимости $F=f(\sigma)$

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

$$E_{\text{э}} < E_{\text{п.с}},$$

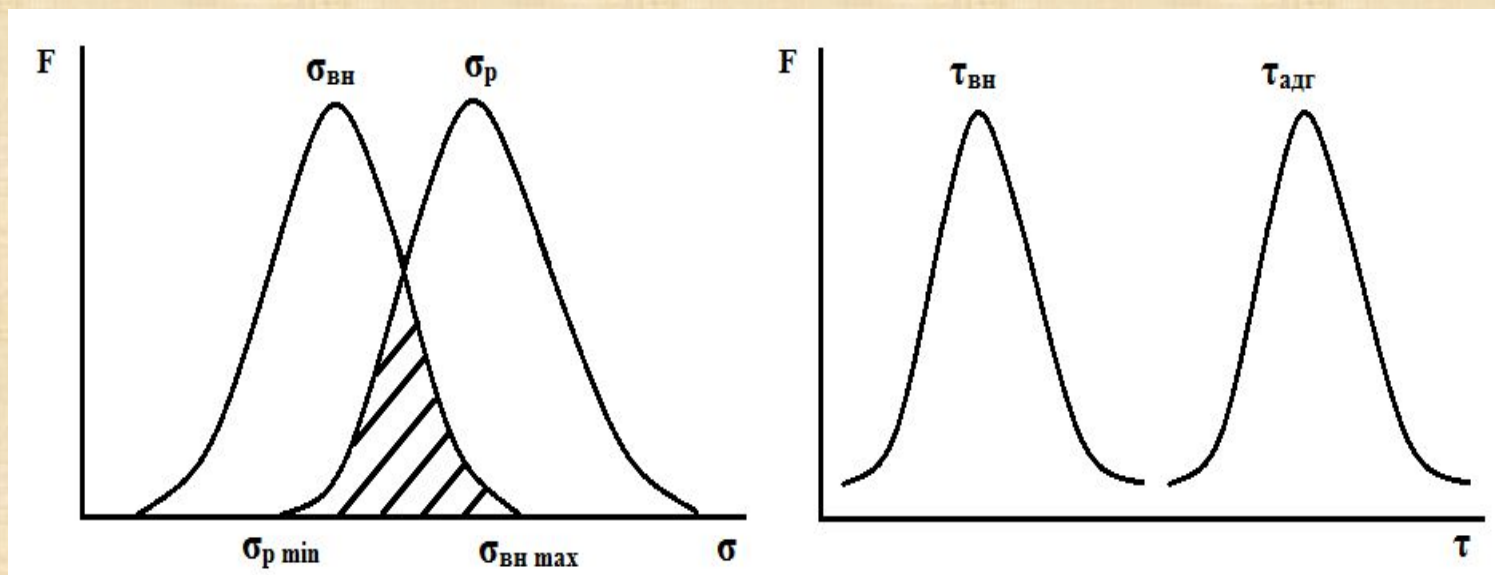
1. Совместимая система, не подверженная растрескиванию и расслоению

$\sigma_{p \min} > \sigma_{\text{вн max}}$ (нет заштрихованной площади) и $\tau_{\text{вн max}} < \tau_{a \min}$ (нет заштрихованной площади)



2. Растрескивание и снижение U_{pr} изоляции

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



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

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

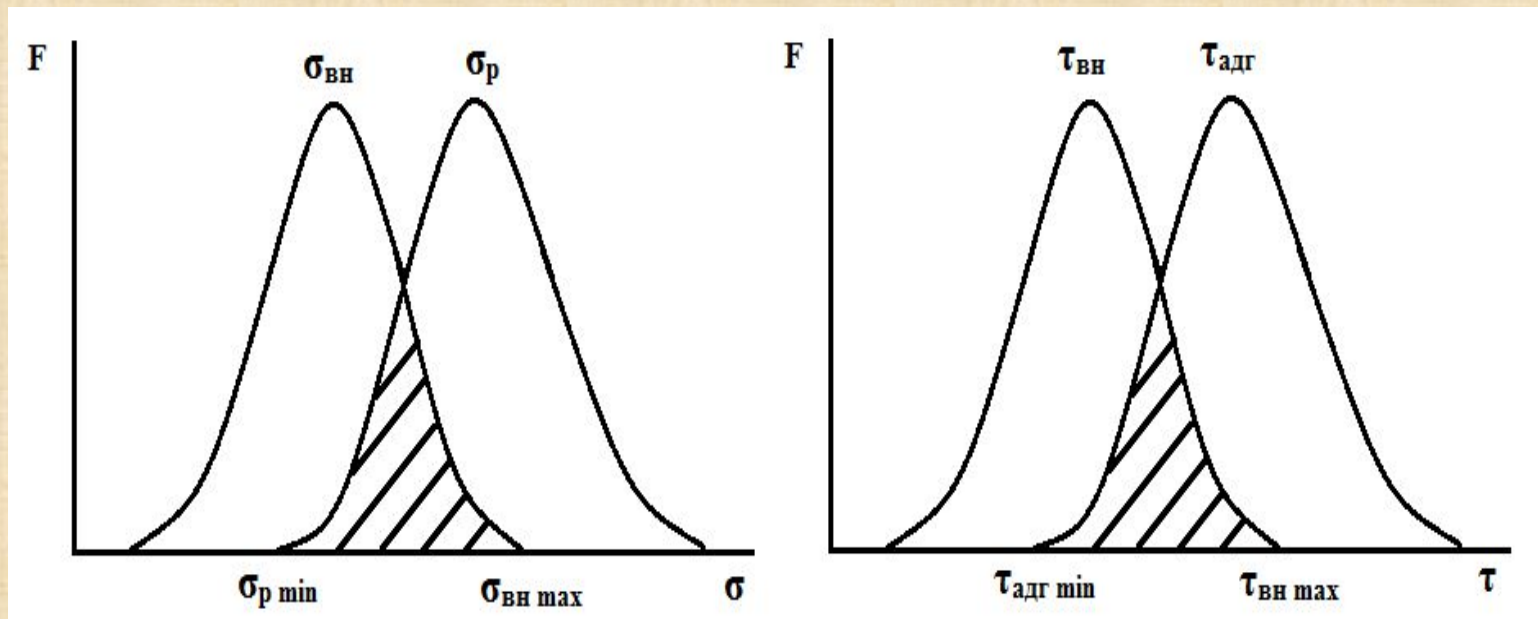


График зависимости $F=f(\sigma)$ и $F=f(\tau)$

$$E_{\text{э}} > E_{\text{п.с}}$$

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

- Аналитический срок службы по адгезии

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

где τ – срок службы при заданной температуре;

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

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

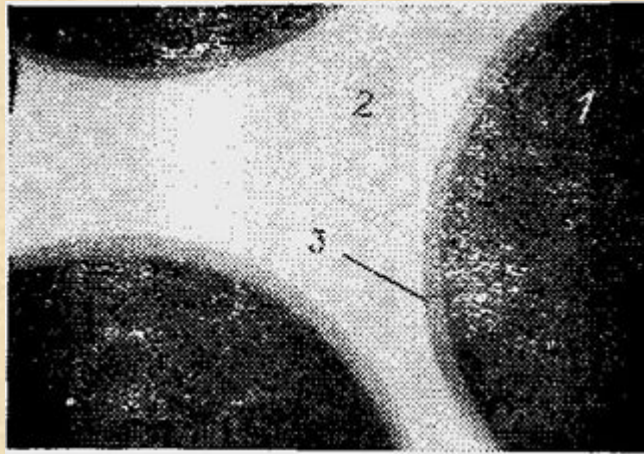
γ – безразмерная величина, зависящая от граничного слоя полимера, прилегающего к субстрату, и толщины полимерной пленки;

σ – внутренние напряжения в полимере, МПа.

Микро конструкция межвитковой изоляции

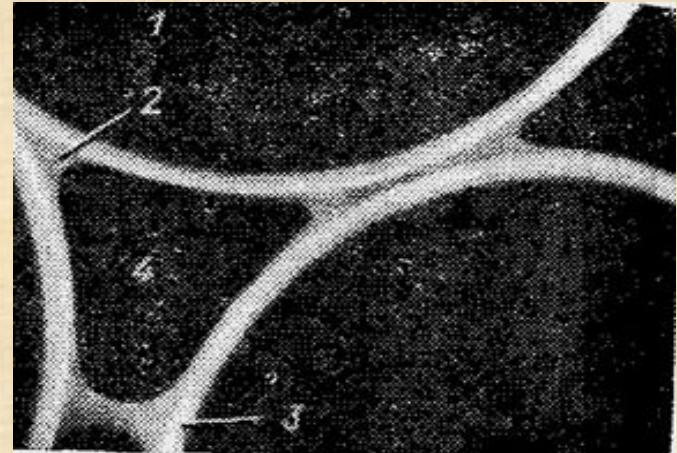
монолитная – при полном заполнении межвиткового пространства пропиточным материалом

сотовая – пропиточный состав располагается в виде тонкой пленки вокруг провода



Монолитная конструкция межвитковой изоляции

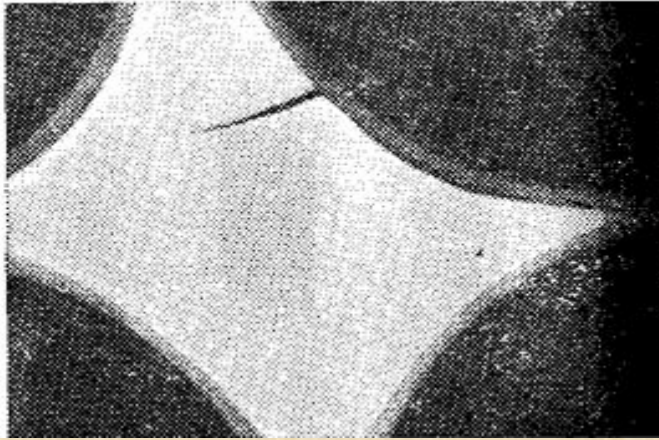
1 – провода; 2 – пропиточный компаунд; 3 – пленка эмали на проводе



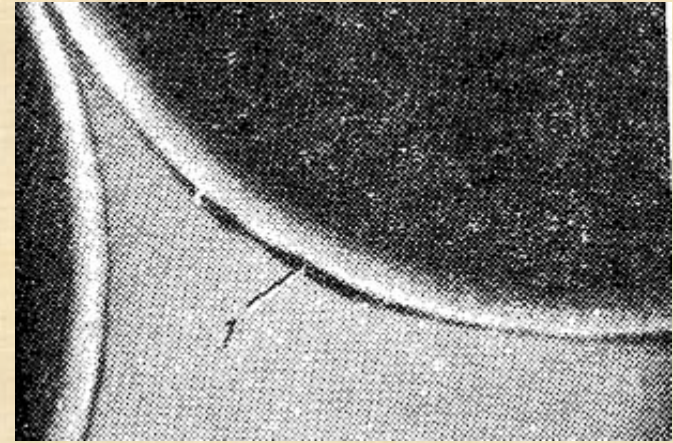
Сотовая конструкция межвитковой изоляции

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 и (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	7Н	2Н	2Н	2Н	2Н

* 7Н - наиболее твердый карандаш, 2Н - 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 эмалированных провод - пропиточный материал
(в скобках показаны ТГМ – индексы пропиточного лака и пленки эмали обмоточных проводов)

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