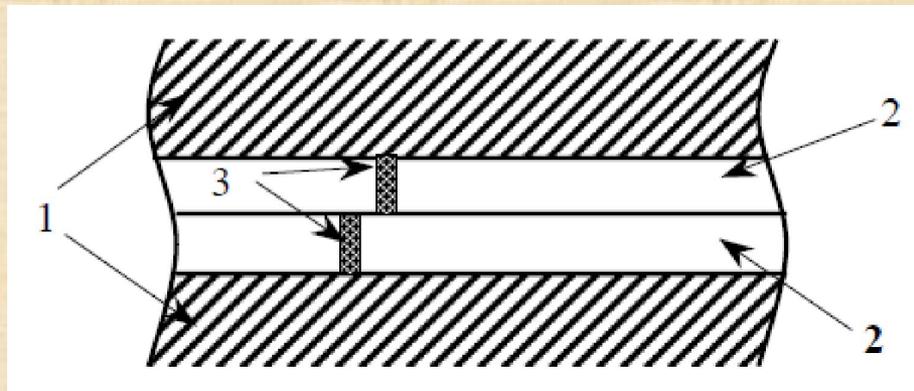


# **Совместимость материалов**

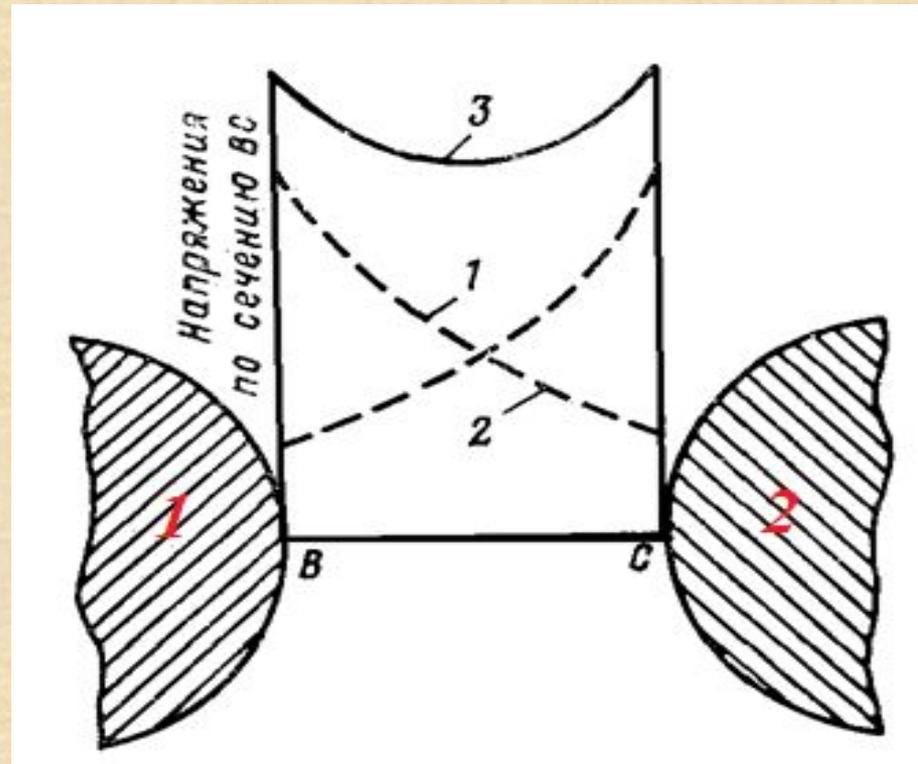
**Под совместимостью понимается свойство системы из различных ЭИМ совместно работать в определенных условиях эксплуатации и в определенных конструкциях без взаимного или одностороннего отрицательного воздействия, снижающего качество конструкции в целом.**

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

2) Эксплуатационная совместимость – способность эмалевого изоляционного 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  $\alpha_m$  – ТКЛР металла;  
 $\alpha_n$  и  $E$  – ТКЛР и модуль упругости полимерного материала;  
 $\Delta T$  – 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  $\mu$  - коэффициент Пуассона полимерного материала.

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

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

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

- 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  $\sigma_p$  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.

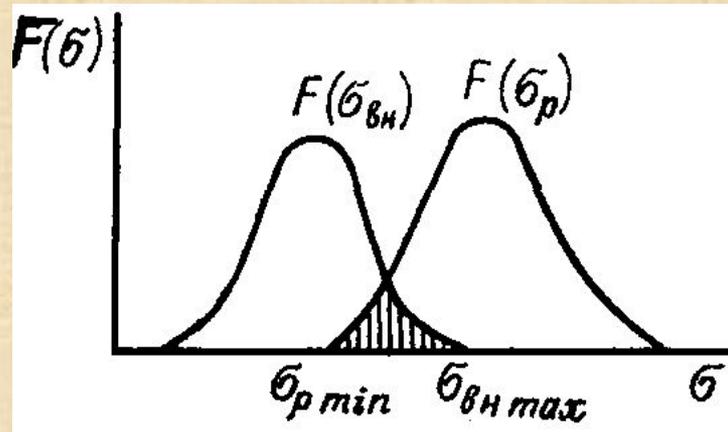


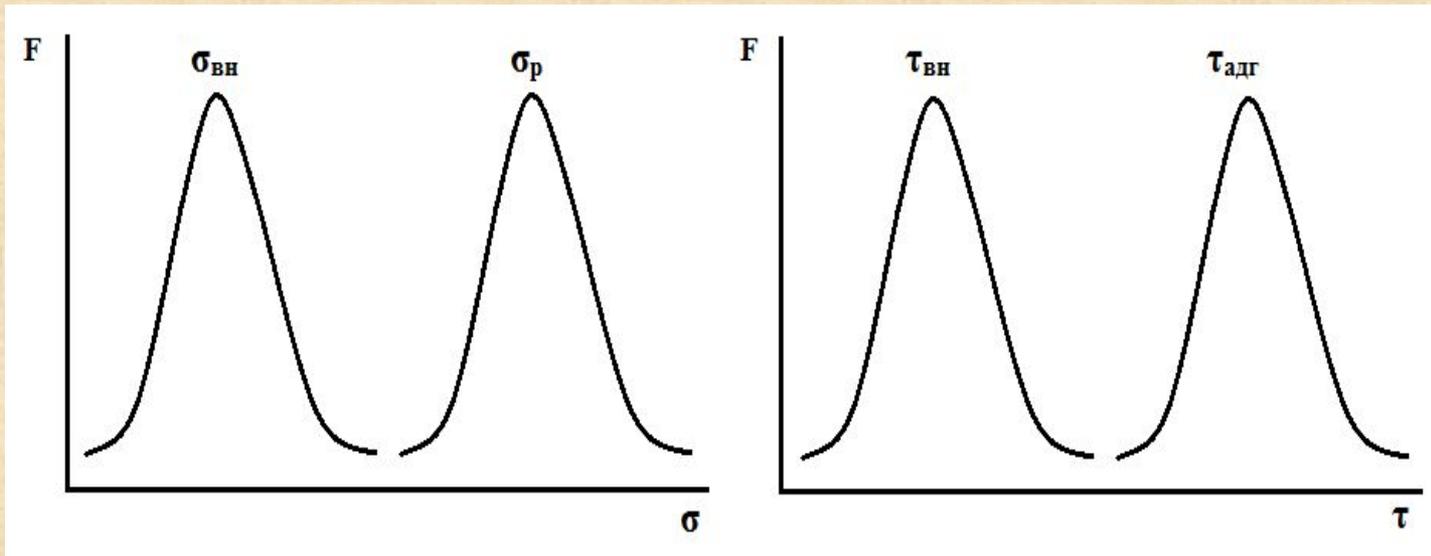
График зависимости  $F=f(\sigma)$

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

$$E_{\text{э}} < E_{\text{п.с}},$$

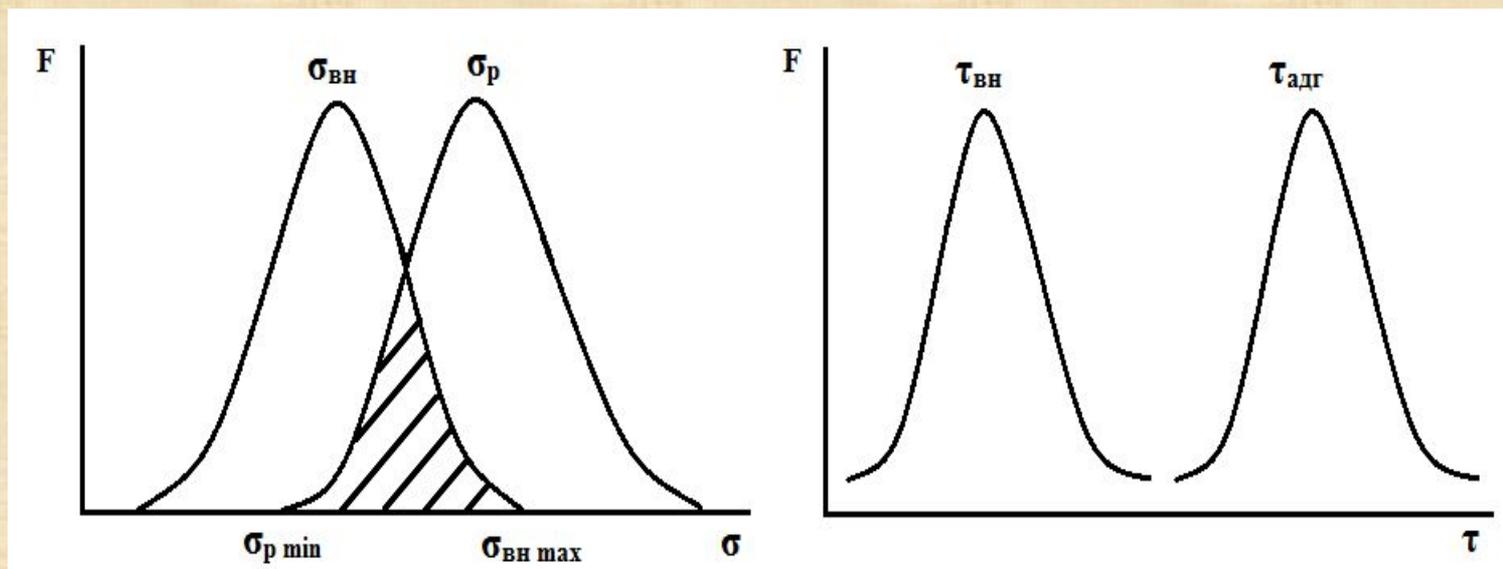
### 1. Совместимая система, не подверженная растрескиванию и расслоению

$\sigma_{p \min} > \sigma_{\text{вн max}}$  (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)

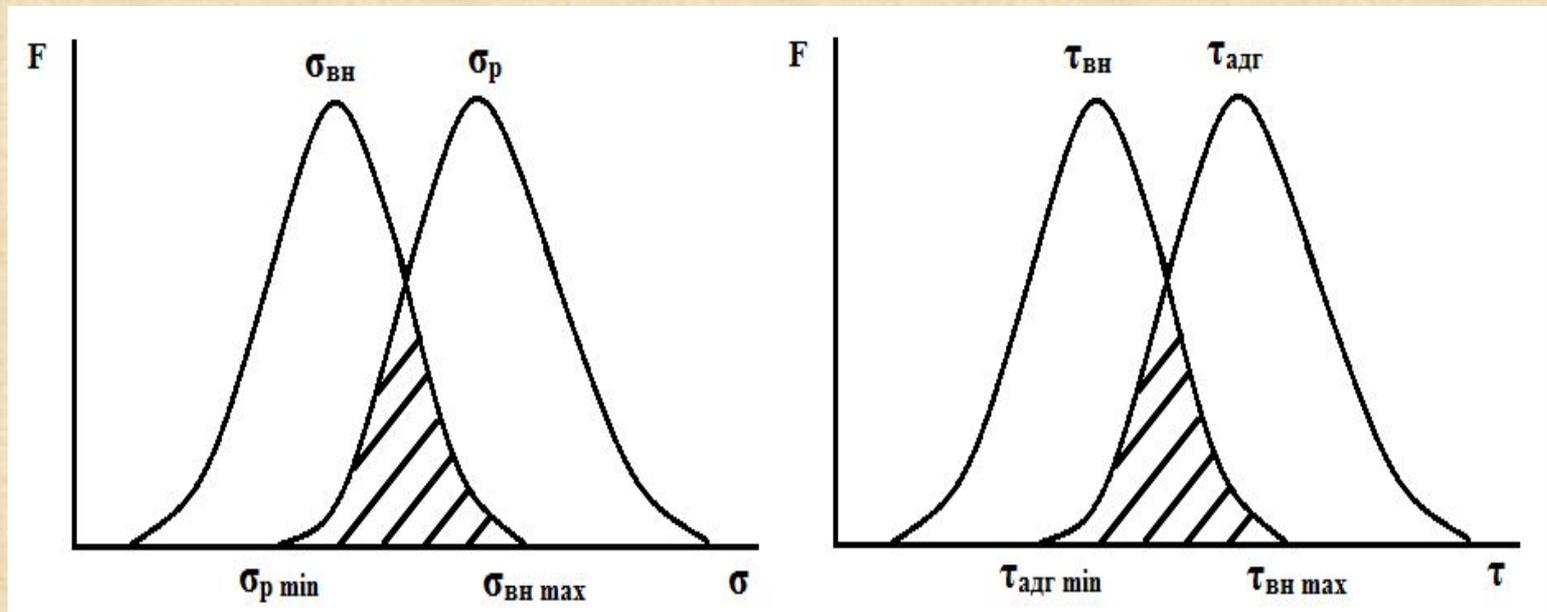


График зависимости  $F=f(\sigma)$  и  $F=f(\tau)$

$$E_{\text{э}} > E_{\text{п.с}}$$

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  $\tau$  – 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;

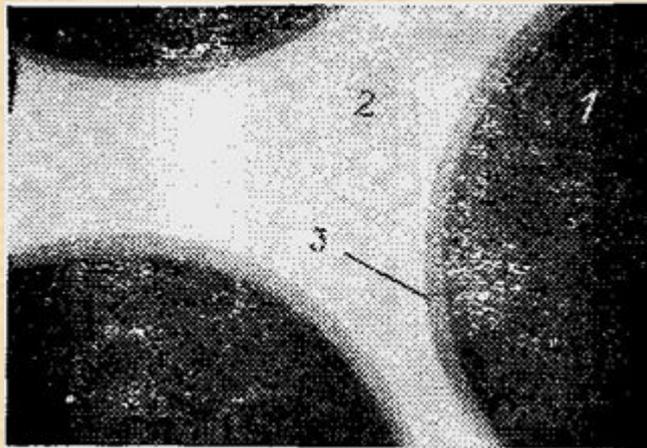
$\gamma$  – безразмерная величина, зависящая от граничного слоя полимера, прилегающего к субстрату, и толщины полимерной пленки;

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

## Микро конструкция межвитковой изоляции

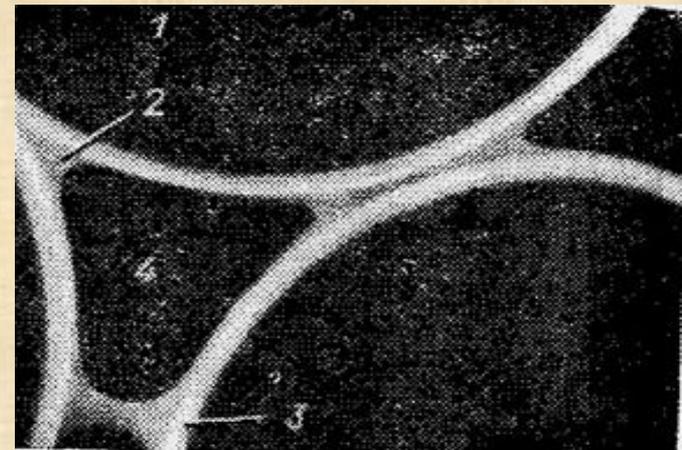
монолитная – при полном заполнении межвиткового пространства пропиточным материалом

сотовая – пропиточный состав располагается в виде тонкой пленки вокруг провода



### Монолитная конструкция межвитковой изоляции

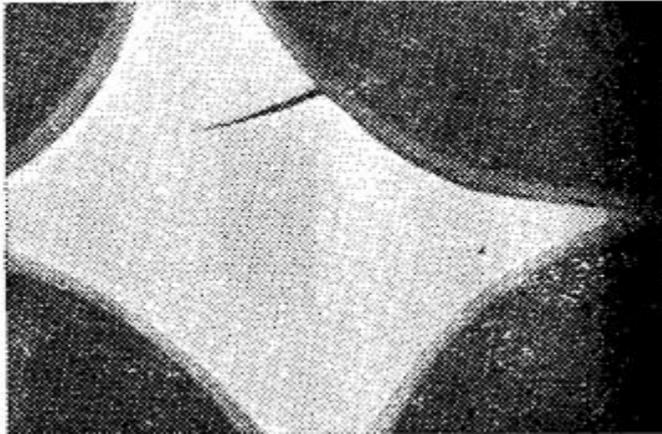
1 – провода; 2 – пропиточный компаунд; 3 – пленка эмали на проводе



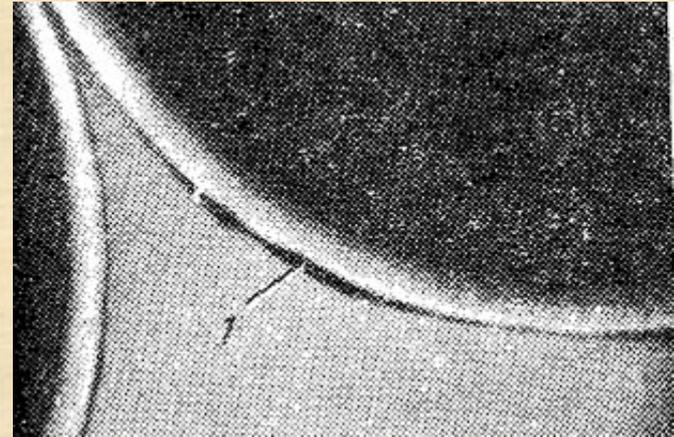
### Сотовая конструкция межвитковой изоляции

1 – провода; 2 – пропиточный материал; 3 – пленка эмали на проводе; 4 – полость, не заполненная лаком

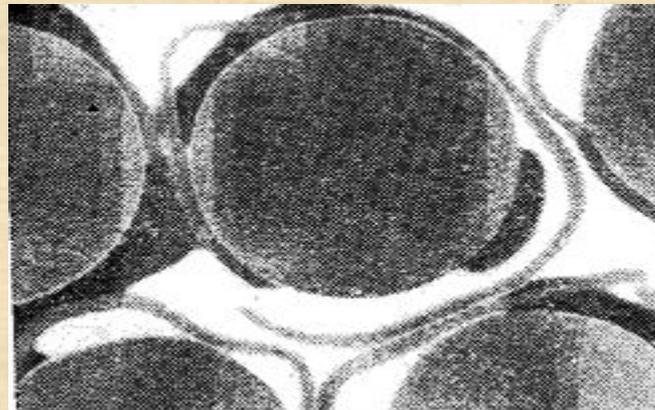
## Несовместимые системы.



**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 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