



*A Furukawa Company*

# **ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ**

**Андрей Столов**

*OFS, Specialty Photonics Division, 55 Darling Drive, Avon, CT 06001*

*Пермь, Октябрь 2011*



A Furukawa Company

## Классификация волоконных световодов

- **Традиционные (стандартные)**
  - Сердцевина 8 - 100  $\mu\text{m}$ , оболочка 125  $\mu\text{m}$ , полимерное покрытие 250  $\mu\text{m}$
  - Разработаны для пассивной передачи оптического сигнала при телекоммуникации
- **Специальные**
  - Все остальные



A Furukawa Company

## **«Специальные» волоконные световоды**

- **Световод разрабатывается под конкретное применение**
  - Собственно световод (сердцевина, оболочка)
  - Полимерное покрытие
  - Буфер и/или кабель



A Furukawa Company

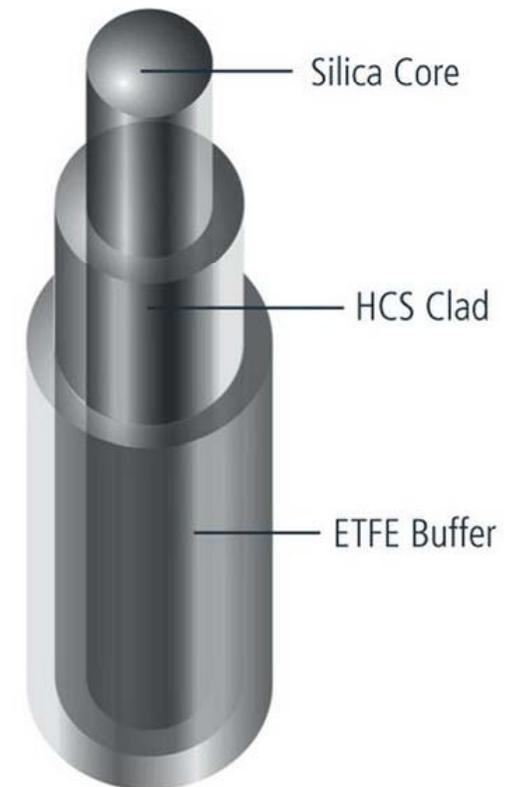
## «Специальные» волоконные световоды

### ▪ Примеры задач

- Низкие/высокие температуры
  - Внутри двигателя автомобиля
  - Крылья самолета
- Агрессивные среды
  - Нефтяные скважины
  - Паровые турбины
- Передача сигналов высокой мощности
  - Лазерная сварка
- Медицина
  - Внутри кровеносных сосудов

## Пример: подрывные работы

- Бикфордов шнур → волоконный световод
- Требования
  - Высокая интенсивность оптического сигнала
    - Большой диаметр сердцевины
  - Гибкость
    - Минимальная толщина оболочки
- Разработка
  - Сердцевина – кварц (диаметр 200  $\mu\text{m}$ ,  $n = 1.453$ )
  - Оболочка – полимерное покрытие (толщина 15  $\mu\text{m}$ ,  $n = 1.405$ )
  - Буфер ПЭТФЭ (диаметр 500  $\mu\text{m}$ )
- Ensing-Bickford → Spectran → Lucent → OFS

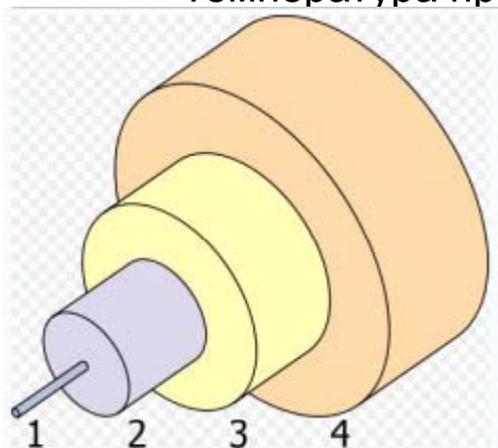


## Виды покрытий

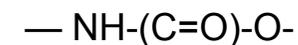
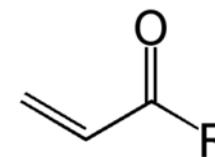
- **Акрилатные**
  - Двухслойные (стандартный набор)
  - Однослойные
- **Оптические**
  - Фторакрилатные ( $n < 1.453$ )
- **Силиконовые**
  - В комбинации с акрилатными покрытиями или буфером
- **Полиимидные**
- **Герметичные**
  - Углеродные
  - Керамические
  - Металлические
- **Прочие**
  - Write-through (для записи решеток Брэгга)
  - Эпоксидные
  - Огнеустойчивые...

## «Стандартные» покрытия

- **Двухслойные акрилатные покрытия**
  - Быстрота УФ-отверждения, отсутствие летучих веществ, низкая чувствительность к микроизгибам, легкость удаления, дешевизна
  - Толщина 60  $\mu\text{m}$  (30  $\mu\text{m}$  первичный + 30  $\mu\text{m}$  вторичный)
  - Разработаны для применения в нормальных атмосферных условиях
  - Температура применения  $\leq 85^\circ\text{C}$

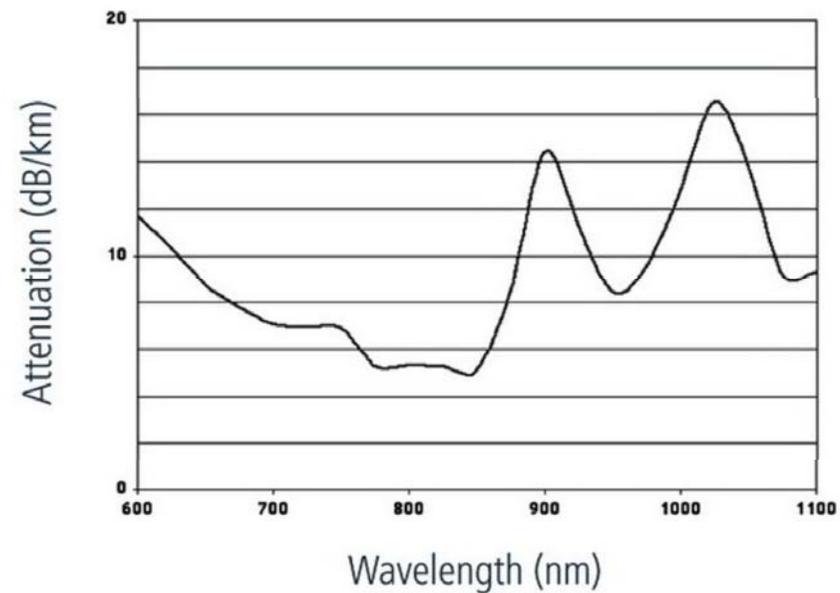
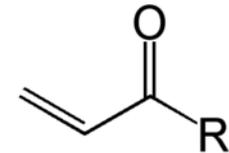
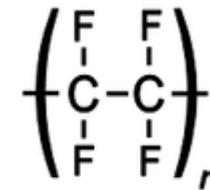


- 1 – сердцевина
- 2 – оболочка
- 3 – первичное (мягкое) покрытие
- 4 – вторичное (жесткое) покрытие



## Оптические покрытия

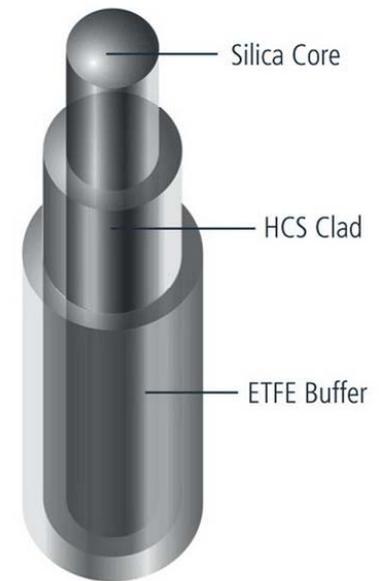
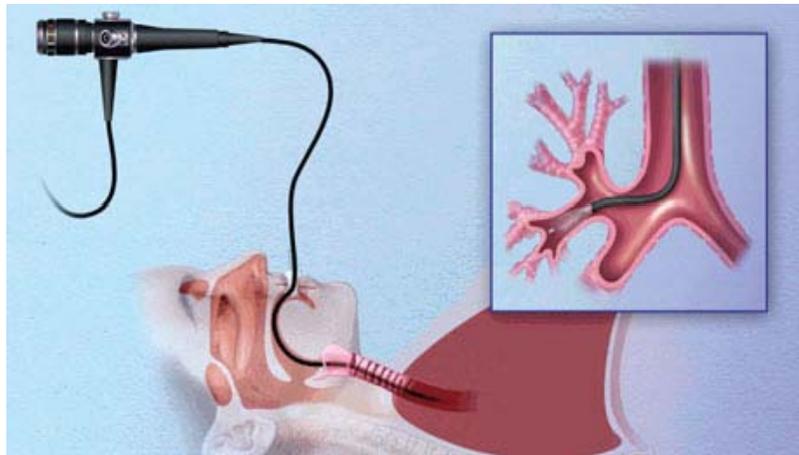
- Требования:  $n < 1.453$ , слабое поглощение/рассеяние света
- Перфторированные акрилаты
- Твердые ( $E \sim 1000$  МПа) и мягкие ( $E \sim 40$  МПа)
- Гидрофобные
- Толщина  $\sim 10 - 15 \mu\text{m}$
- $NA = 0.37$  (... 0.54)
- Затухание  $< 6$  dB/km (850 nm)



## Оптические покрытия

### ■ Применения:

- Передача оптических сигналов высокой мощности
  - Лазерная сварка
  - Лазерная хирургия
  - Освещение (офтальмология)
  - «Вторичная оболочка» для лазерной накачки



- Дополнительное достоинство: коннекторы быстрого монтажа (crimp & cleave)



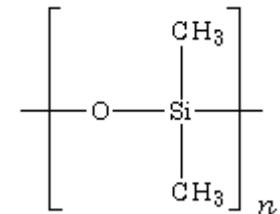
## Силиконовые покрытия

### ■ Полидиметилсилоксан

- Термически отверждаемые
- УФ-отверждаемые

### ■ Свойства

- Мягкие (E ~ 1 МПа)
- Толщина 30 – 150 μm
- Высокая термическая стабильность
- Могут применяться как оптические покрытия
- «Отталкивают» воду и органические растворители
- Генерируют водород
- Требуют «вторичного» покрытия (акрилат, буфер)





A Furukawa Company

## Силиконовые покрытия

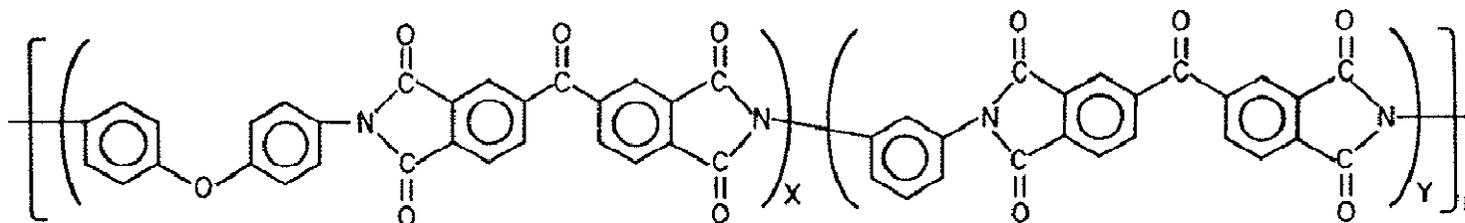
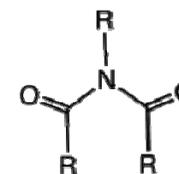
### ■ Применения:

- Авиационно-космическая область
- Нефтяные/геотермальные скважины



## Полиимидные покрытия

- Термически отверждаемые
- Твердые ( $E > 2000$  МПа)
- Толщина 10 – 15  $\mu\text{m}$
- Наиболее высокая термическая стабильность
- Устойчивы к агрессивным средам



## Полиимидные покрытия

### ■ Применения

- Медицина
  - тонкие покрытия
  - устойчивы к стерилизации паром
- Нефтяные скважины
  - Распределенные датчики температуры
  - Распределенные акустические датчики



## Герметичные покрытия

- **Цель: не пропускать молекулы воды и водорода**
  - Углеродные
  - Керамические ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiC}$ , ...)
  - Металлические
- **Наиболее распространены углеродные покрытия**
  - Толщина 30 – 50 nm
  - Применяется в комбинации с полимерным покрытием

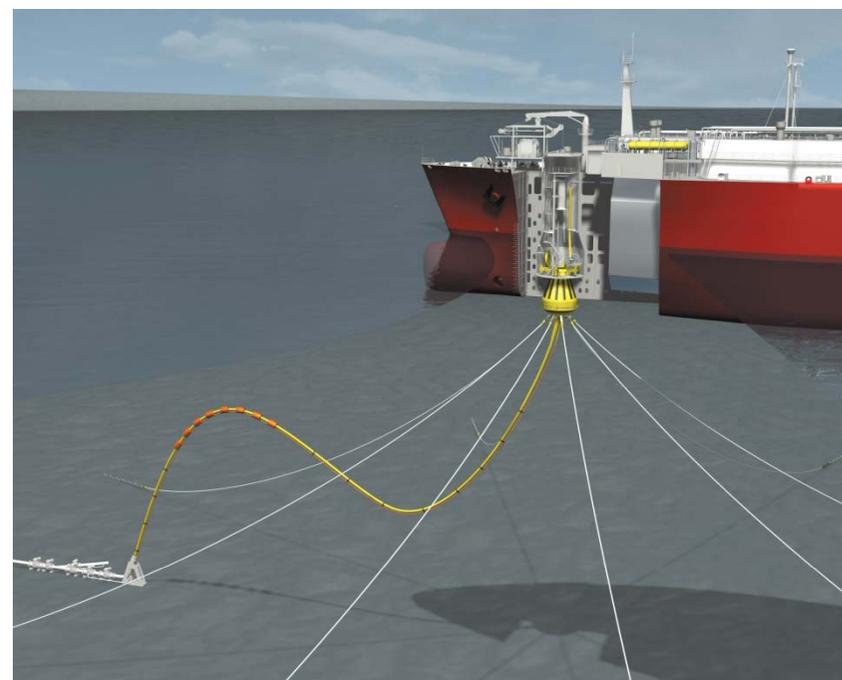


A Furukawa Company

# Герметичные покрытия

## ▪ Применения

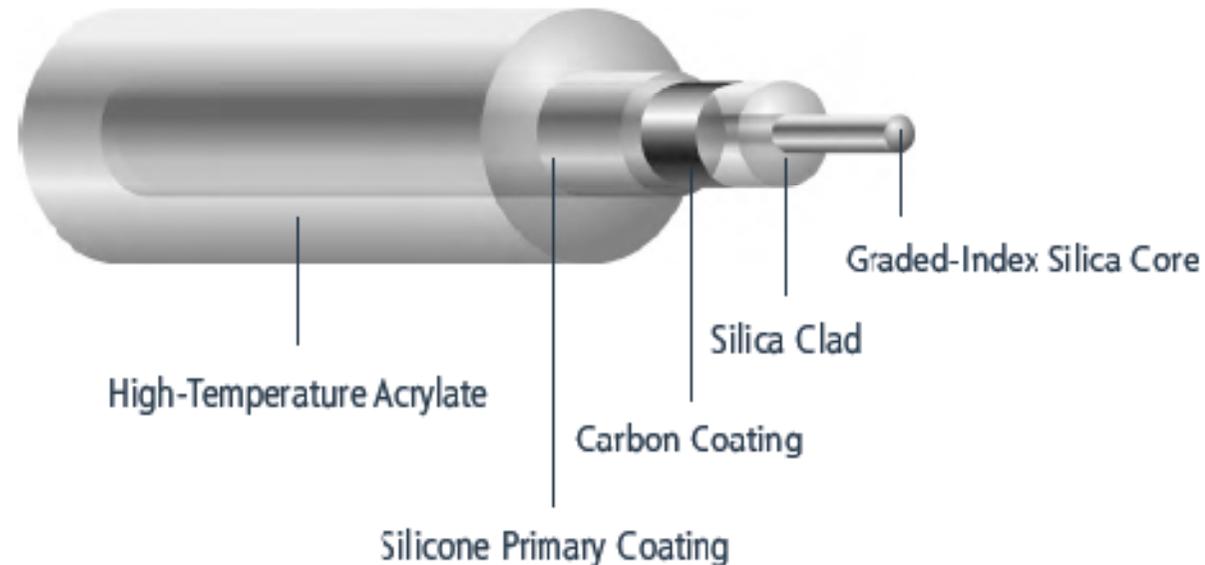
- Нефтяные скважины
- Геотермальные электростанции
- Транспортировка нефти/газа
- Агрессивные среды



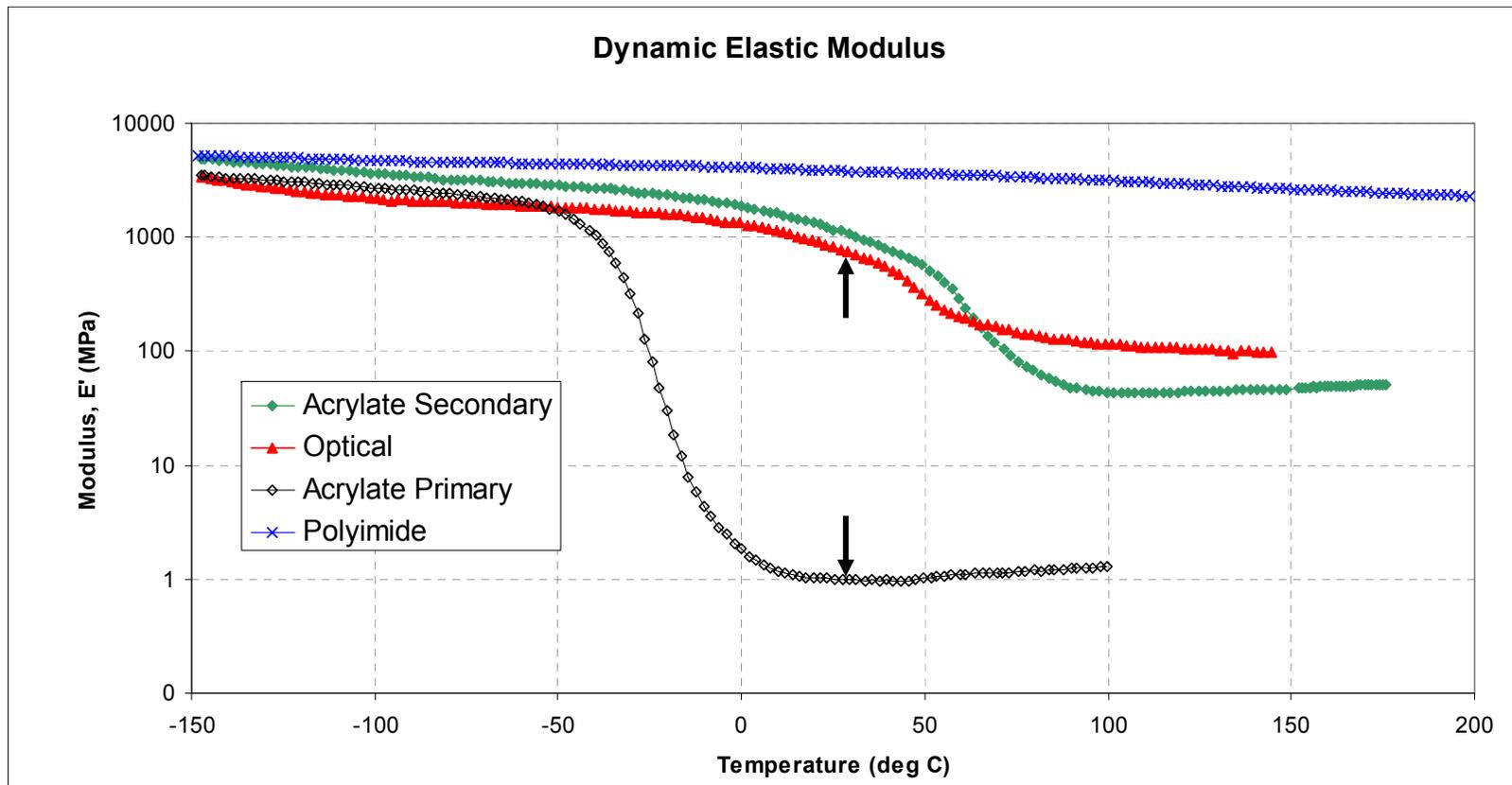
## Комбинированные покрытия

### ■ Углерод/силикон/акрилат

- Улучшенная термическая стабильность (по ср. с двухслойными акрилатными покрытиями)
- Менее затратное производство (по ср. с полиимидным покрытием)



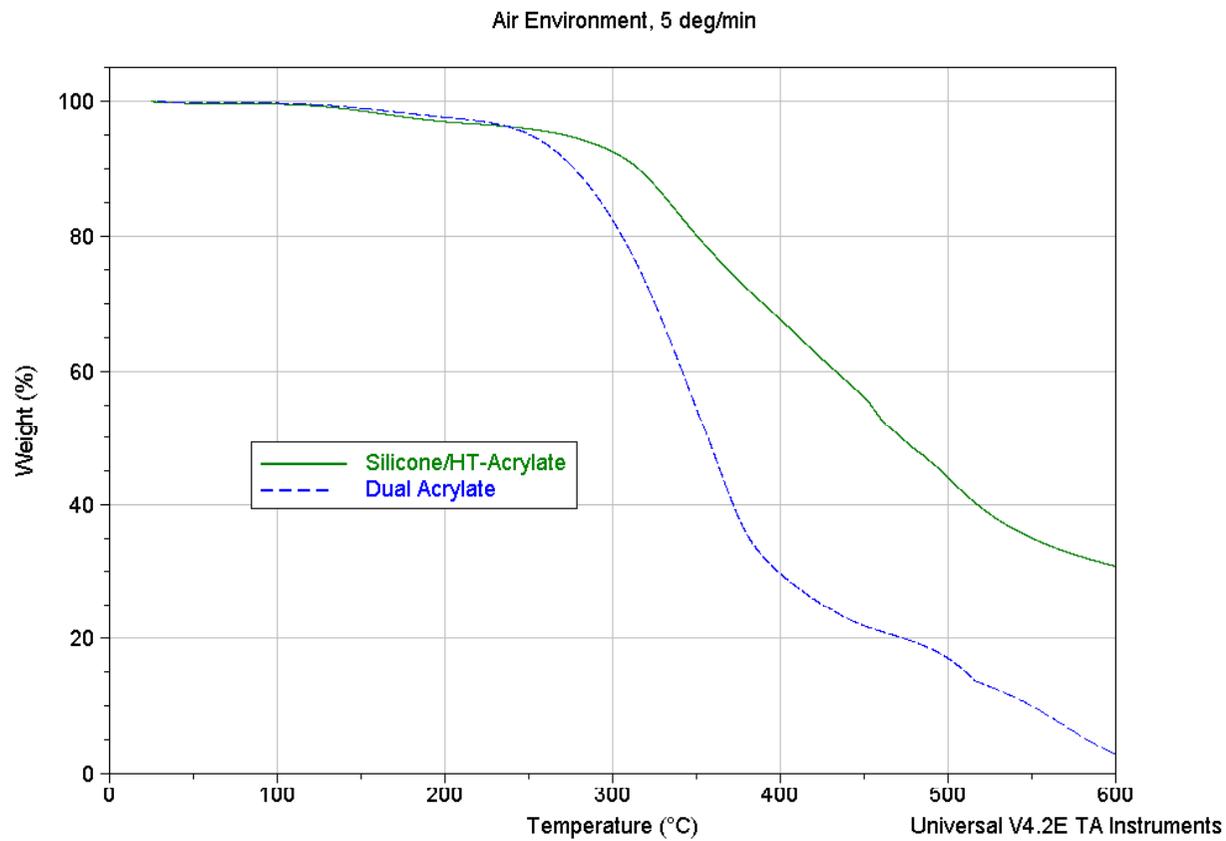
# Механические свойства покрытий



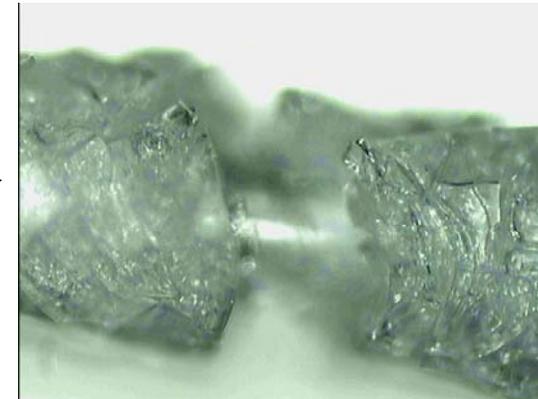
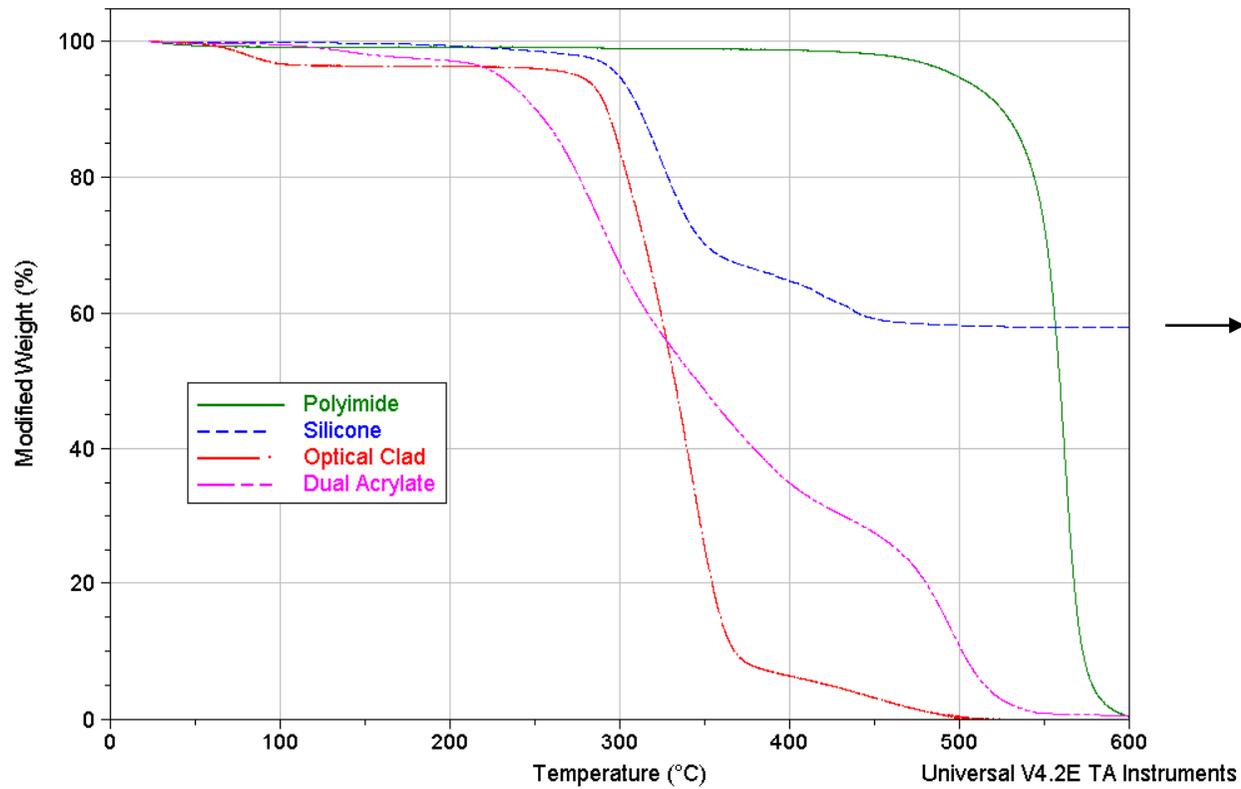
## **Термическая стабильность световода**

- **Зависит от вида использования**
- **Полимерное покрытие разрушается первым**
- **Как долго волоконный световод может быть использован при заданной температуре?**
  - Требования: 1 секунда - 20 лет
- **Какова максимальная температура применения световода (при известном времени использования)?**
  - Грубую, но быструю оценку можно сделать методом термогравиметрического анализа (ТГА)

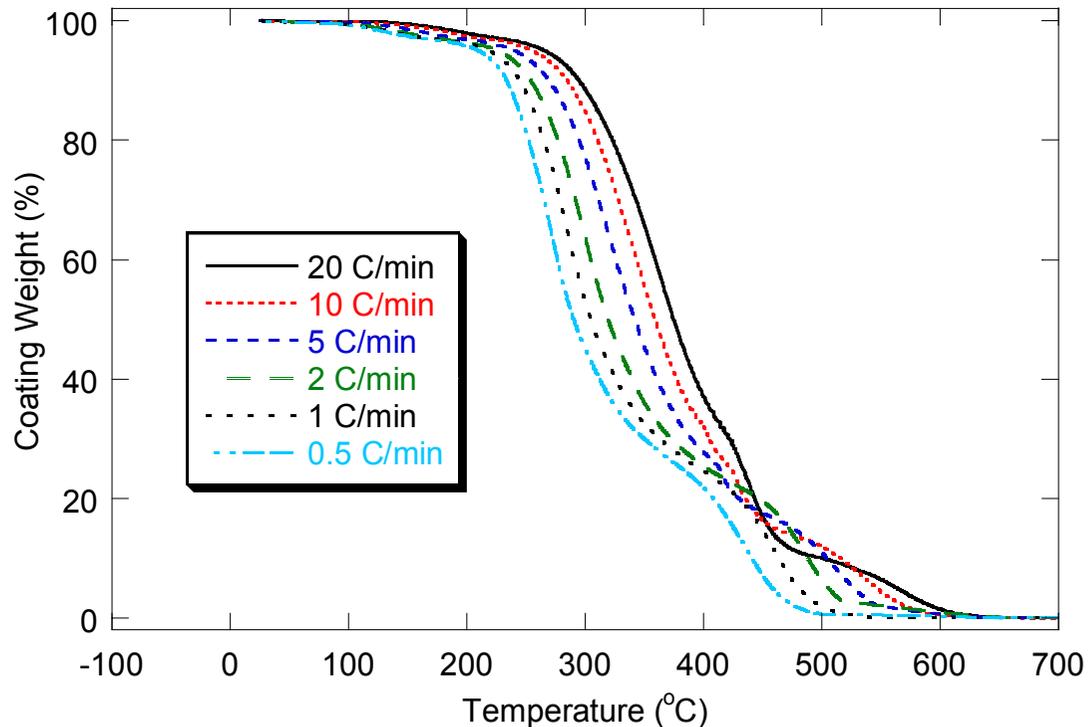
# Термическая стабильность: метод ТГА



# Термическая стабильность: метод ТГА

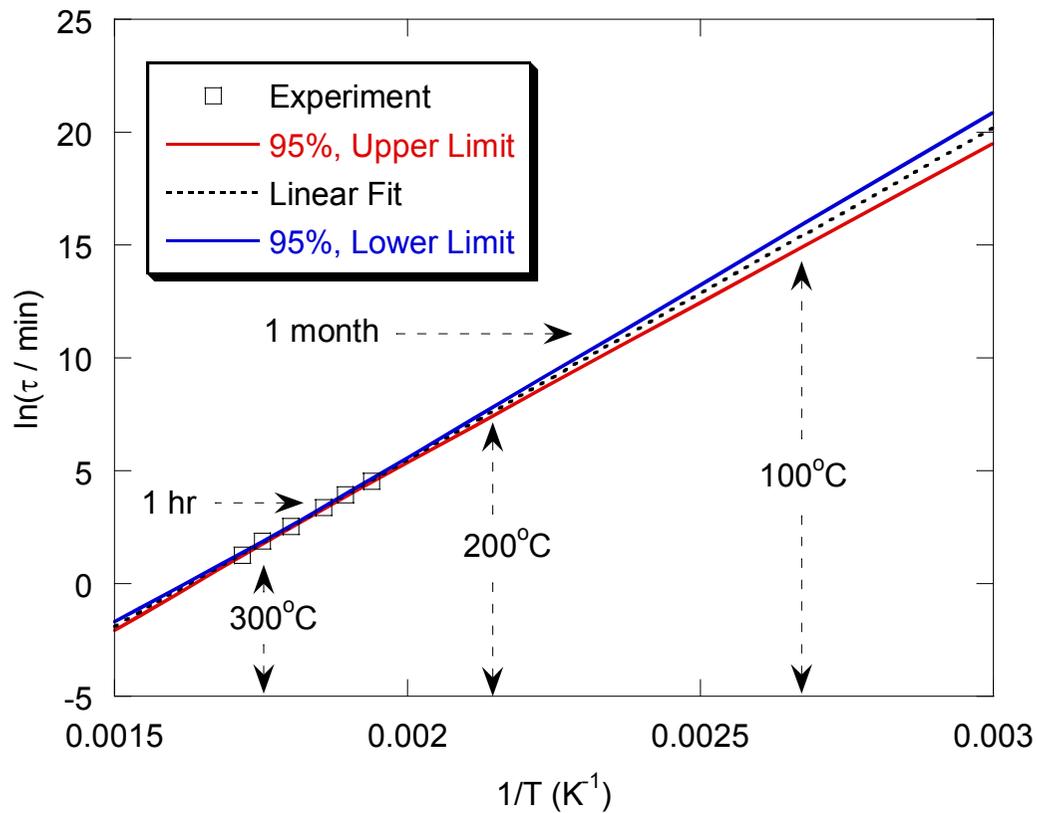


## Как оценить время жизни полимерного покрытия?



- Образцы – кусочки реальных световодов
- Изотермический ТГА при разных температурах
- ТГА при разных скоростях нагревания
- Условный критерий: покрытие разрушается при потере 25%(?) начальной массы
- Экстраполяция Аррениусовой зависимости

## Пример Аррениусовой зависимости: двухслойное акрилатное покрытие

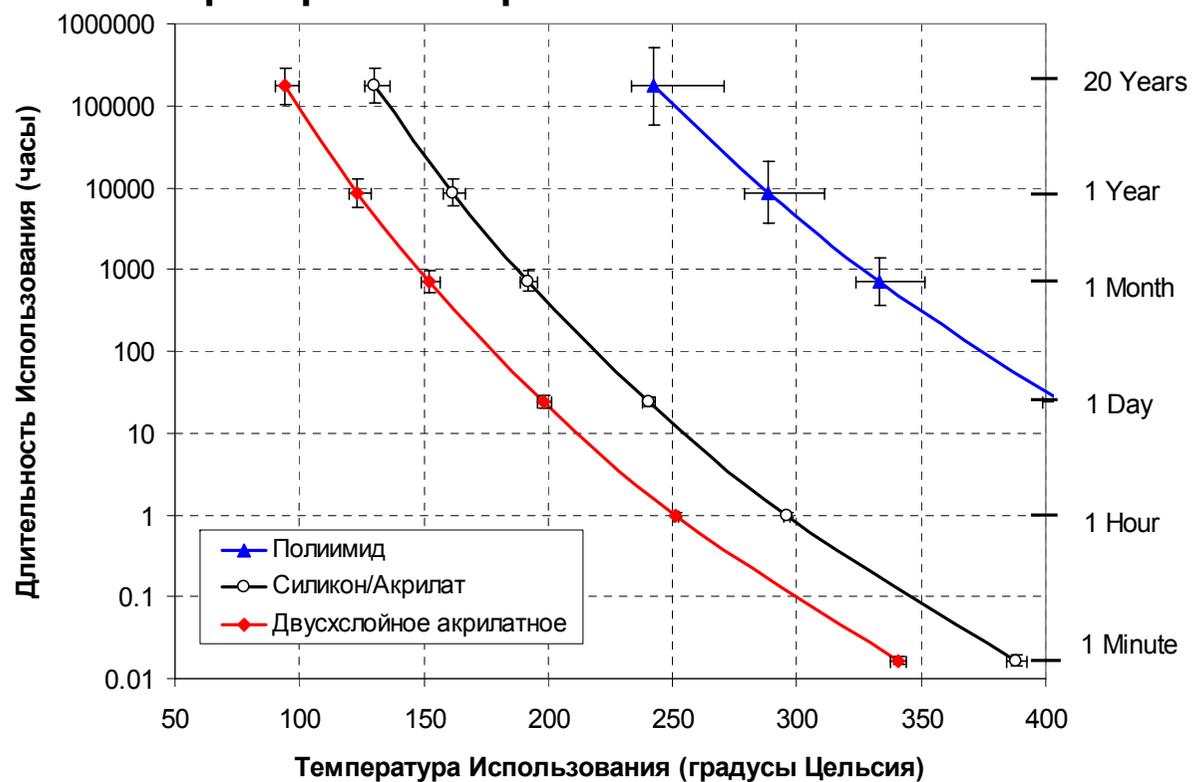


$$\ln \tau_F = \ln \tau_{F0} + \frac{E^*}{RT_{av}}$$

# Термическая стабильность

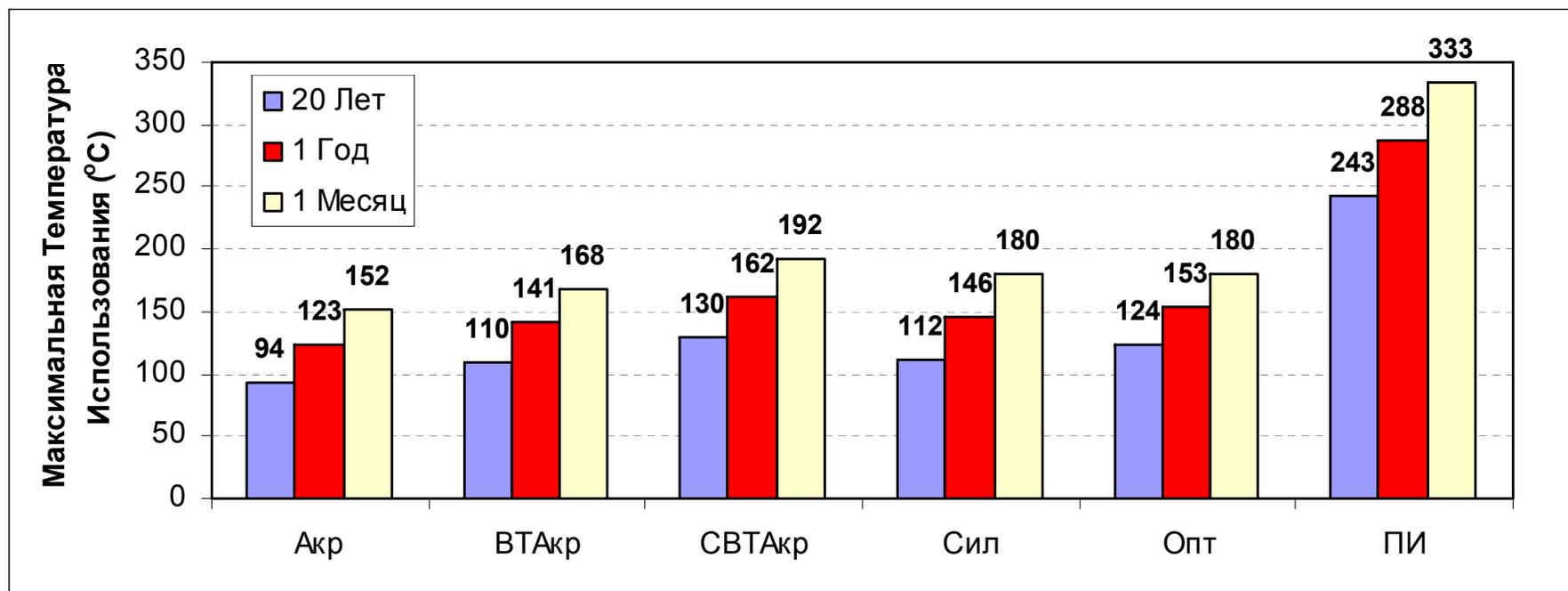
Максимальная температура использования (°C).

Критерий: потеря 25% начальной массы



## Термическая стабильность

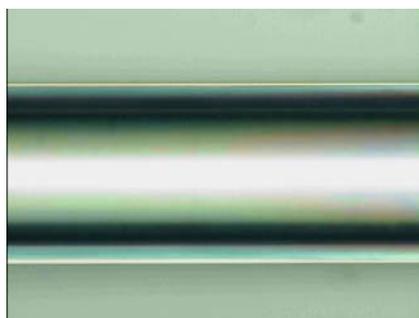
Максимальная температура использования (°C).  
Критерий: потеря 25% начальной массы



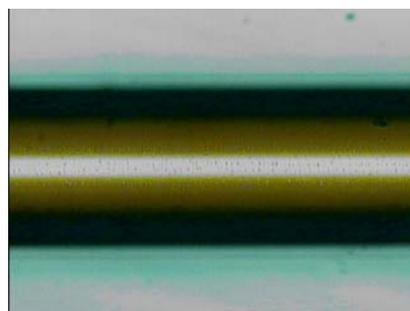


A Furukawa Company

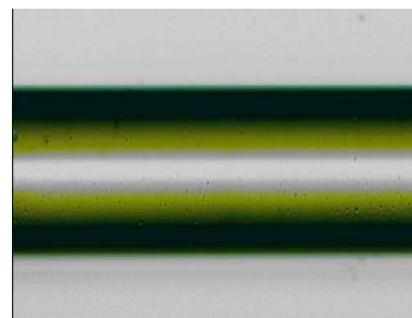
## Термическое старение, 161°C, воздух



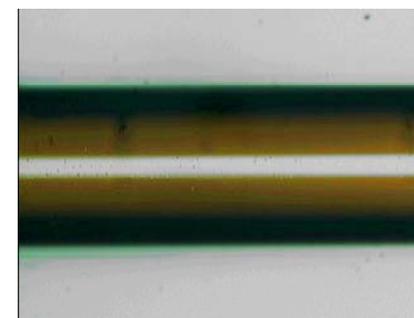
Двухслойное акрилатное  
0 дней



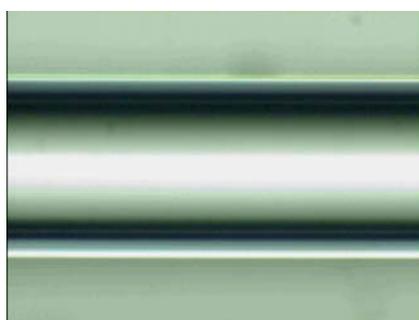
Двухслойное акрилатное  
3 дня



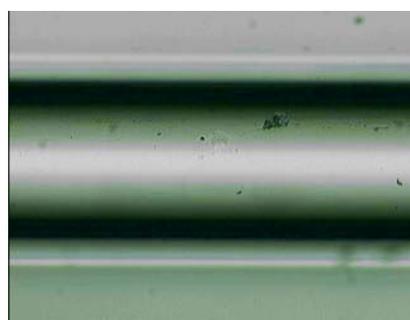
Двухслойное акрилатное  
8 дней



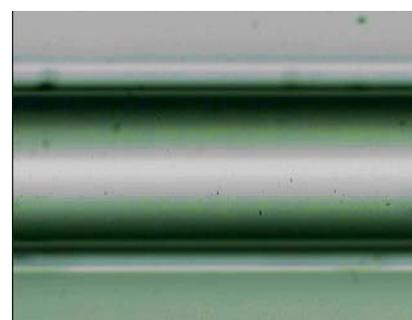
Двухслойное акрилатное  
21 день



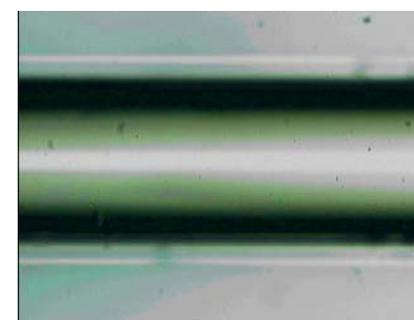
Силикон/акрилат  
0 дней



Силикон/акрилат  
3 дня

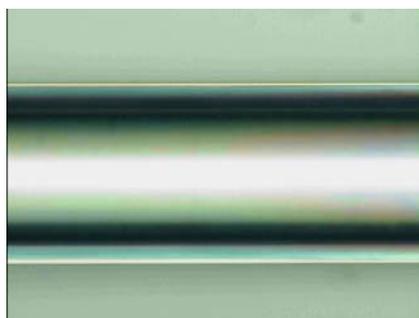


Силикон/акрилат  
8 дней

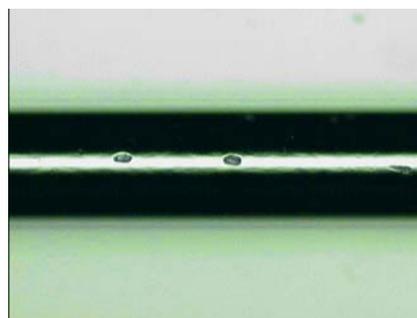


Силикон/акрилат  
21 день

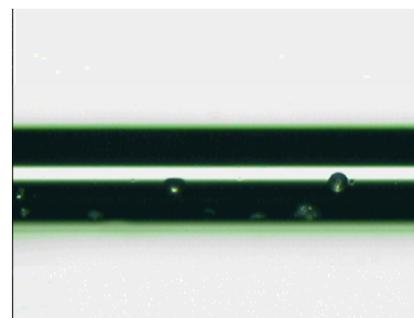
## Термическое старение, 311°C, воздух



Двухслойное акрилатное  
0 дней



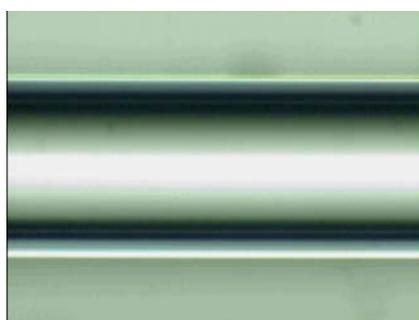
Двухслойное акрилатное  
1 день



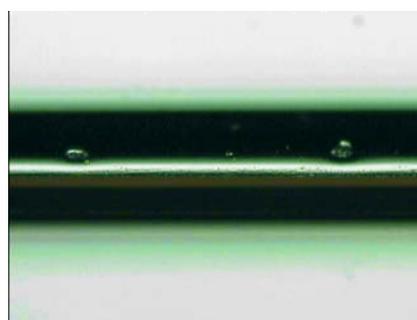
Двухслойное акрилатное  
7 дней



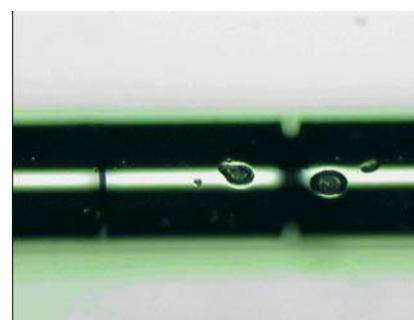
Двухслойное акрилатное  
15 дней



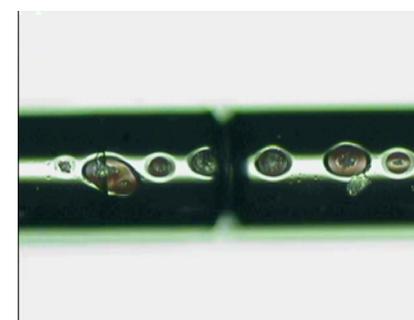
Силикон/акрилат  
0 дней



Силикон/акрилат  
1 день



Силикон/акрилат  
7 дней

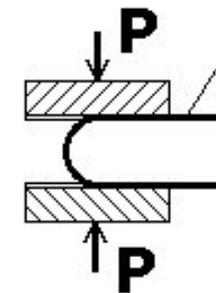
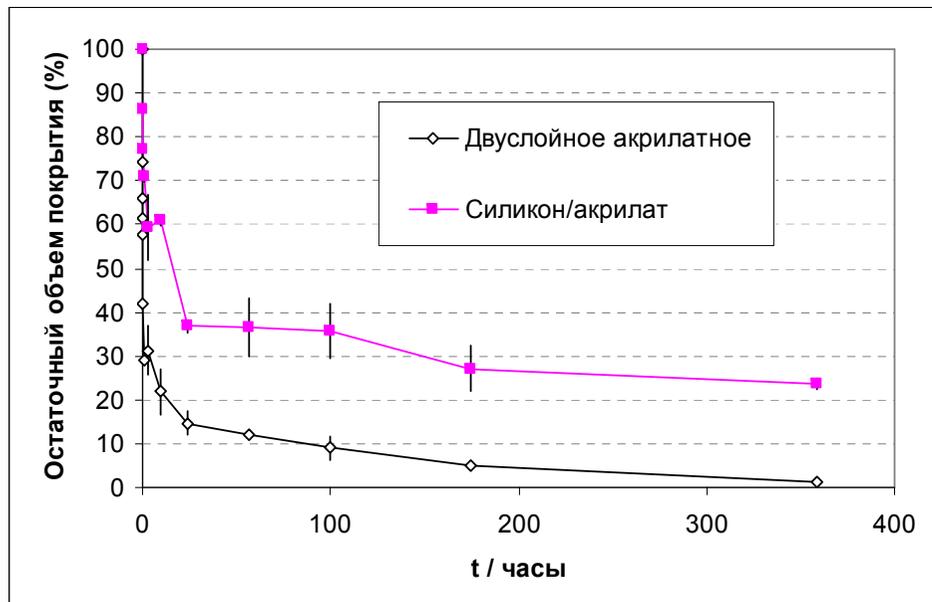


Силикон/акрилат  
15 дней

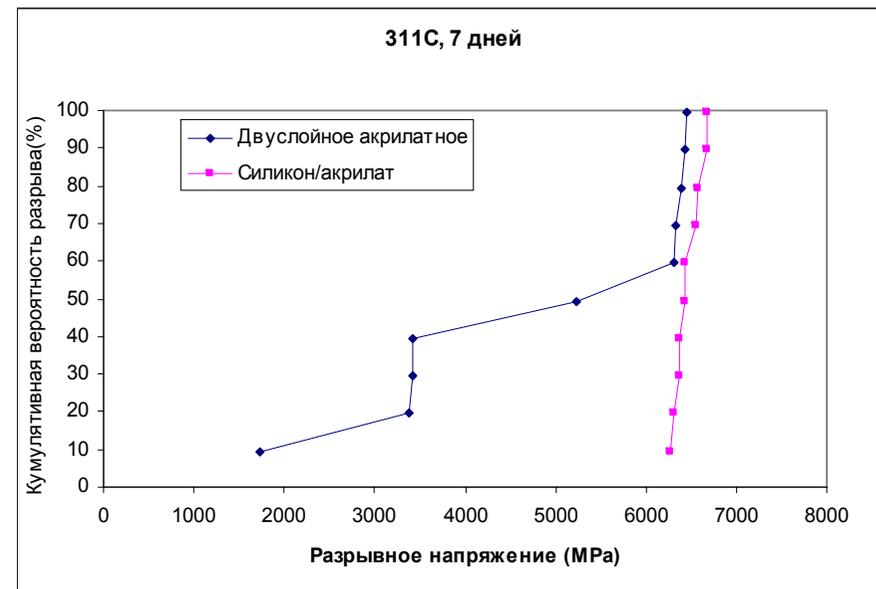


A Furukawa Company

## Термическое старение, 311°C, воздух



Метод  
двухточечного  
изгиба





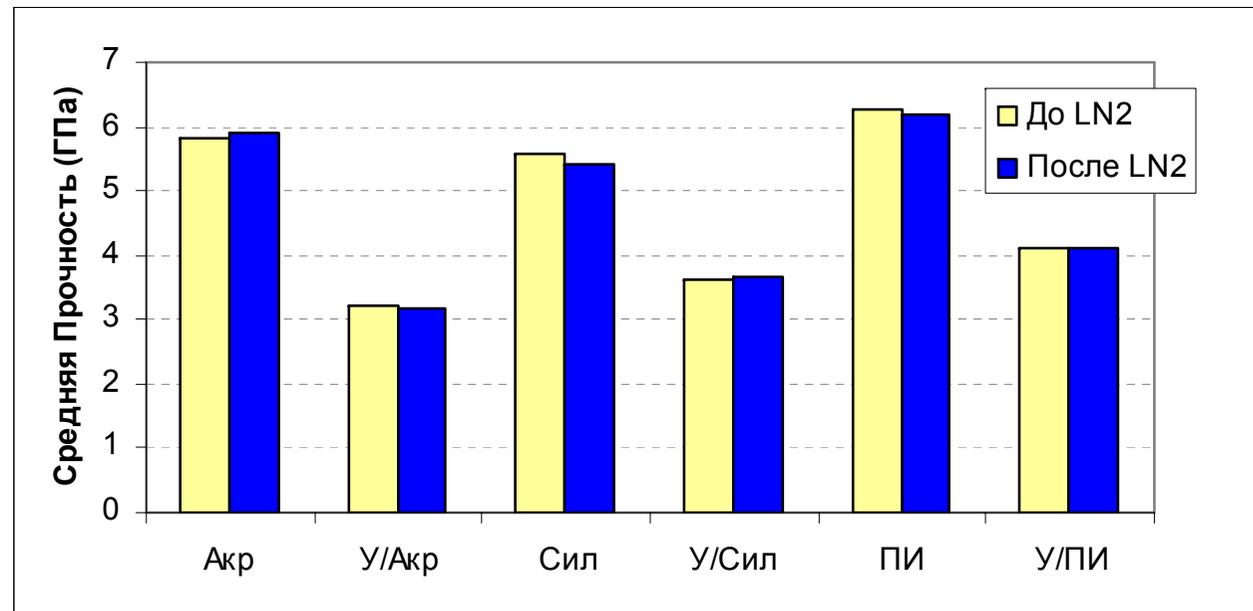
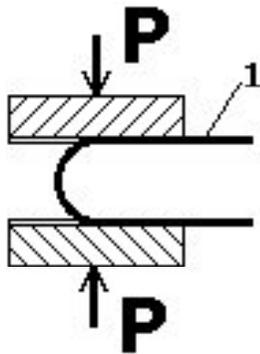
A Furukawa Company

## Поведение при низких температурах

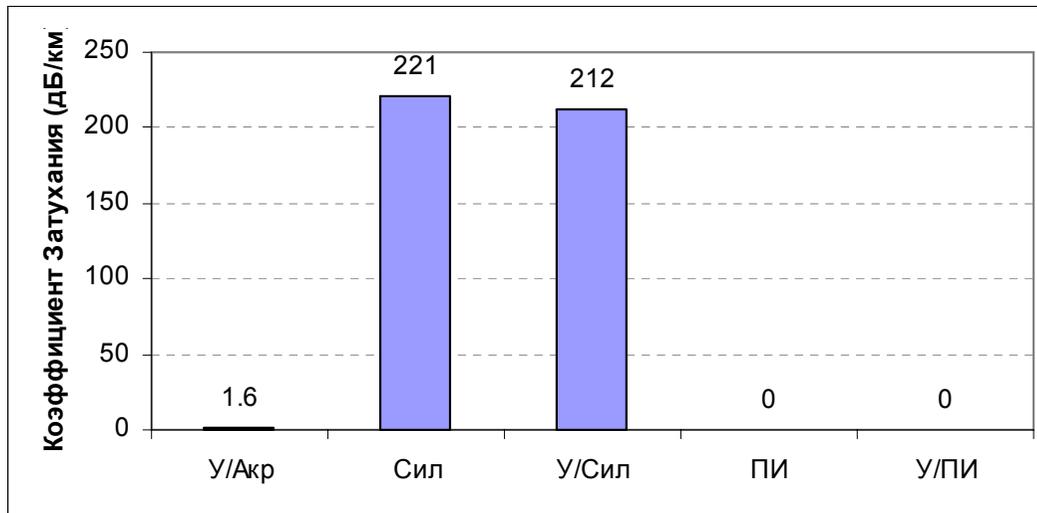
- Параметры световода 50/125  $\mu\text{m}$  (градиентный профиль, NA = 0.2)
  - Виды покрытий:
    - 190/245  $\mu\text{m}$  двухслойное акрилатное (Акр)
    - 40 nm углерод + 190/245  $\mu\text{m}$  двухслойное акрилатное (У/Акр)
    - 155  $\mu\text{m}$  полиимид (ПИ)
    - 40 nm углерод + 155  $\mu\text{m}$  полиимид (У/ПИ)
    - 450  $\mu\text{m}$  силикон (Сил)
    - 40 nm углерод + 450  $\mu\text{m}$  силикон (У/Сил)

## Поведение при низких температурах (-196°C)

- Световоды помещались в жидкий азот
- Прочность измерялась методом двухточечного изгиба



## Поведение при низких температурах



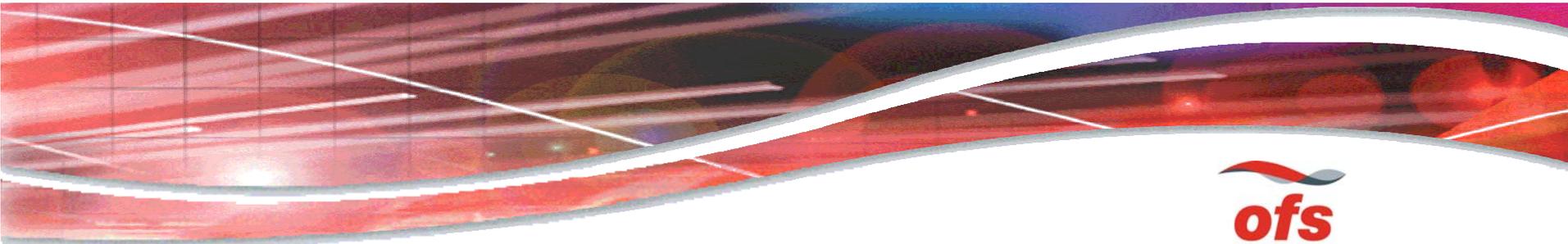
- Углеродное покрытие не влияет на коэффициент затухания
- Полиимидное покрытие – минимальное влияние температуры
  - лучший выбор для распределенных сенсоров температуры
- Siliconовое покрытие – максимальное влияние температуры
  - Можно использовать для обнаружения течи в криогенных системах



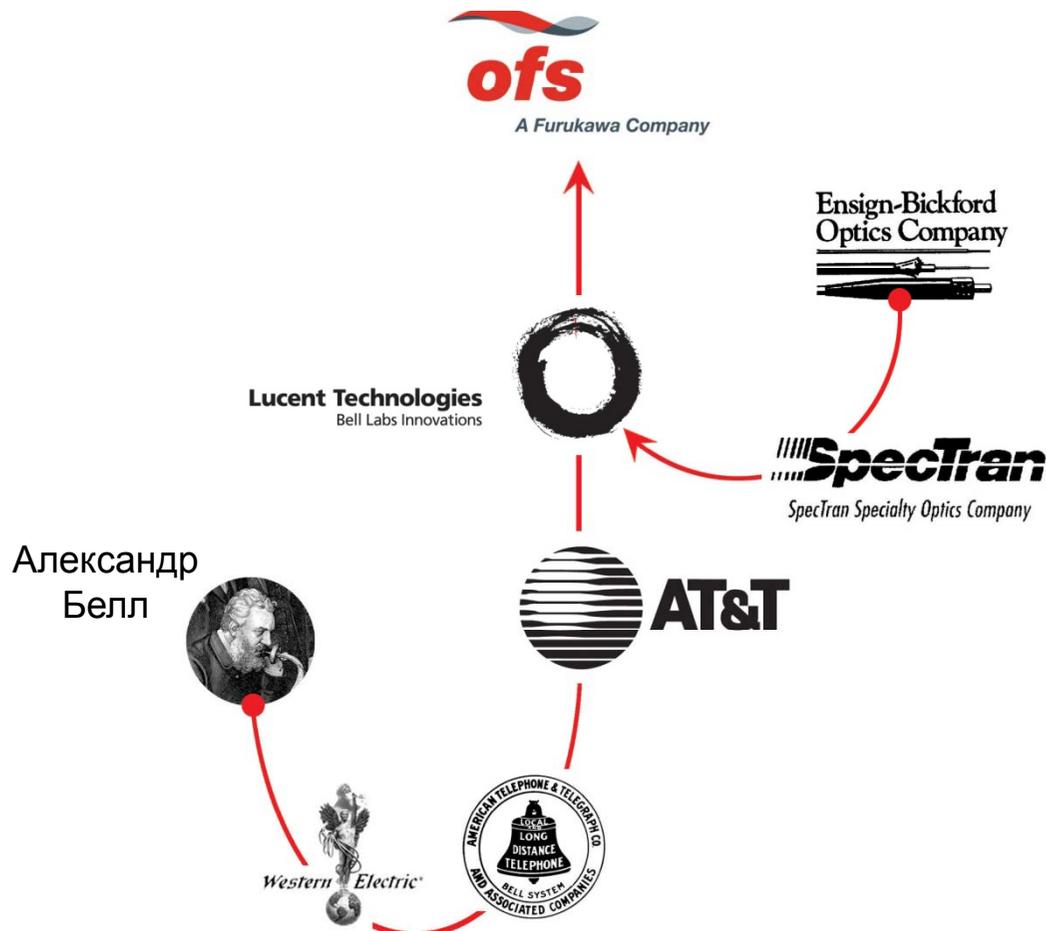
A Furukawa Company

## **Выводы**

- **Знания свойств полимерных покрытий позволяет для каждого конкретного применения**
  - правильно подбирать материалы
  - оптимизировать геометрические параметры покрытий



# Компания OFS (Optical Fiber Solutions)



Телефон

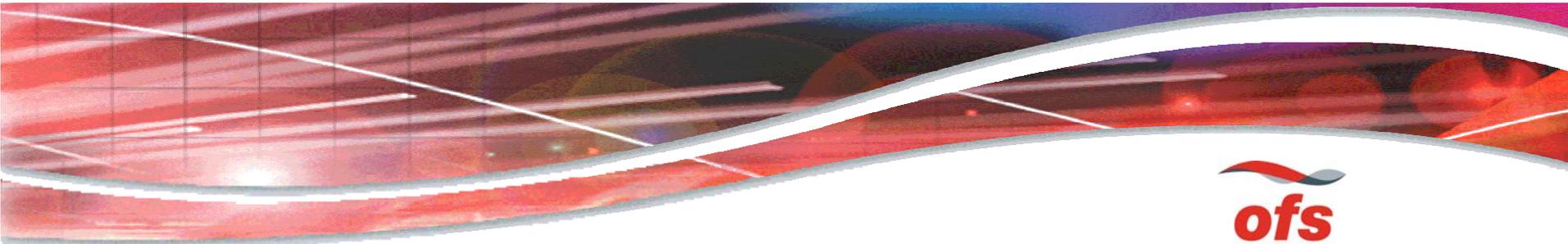
Лазеры      Транзистор

Unix, C, C++

MCVD

Транс-атлантический кабель

Углеродные покрытия



A Furukawa Company

