



**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КМ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЁВ

Преподаватель: Павлова Светлана Александровна,  
ассистент кафедры КиПЛА

Самара  
2020 г.



# Часть 1

## Экспериментальное исследование механических характеристик КМ





# ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ КМ

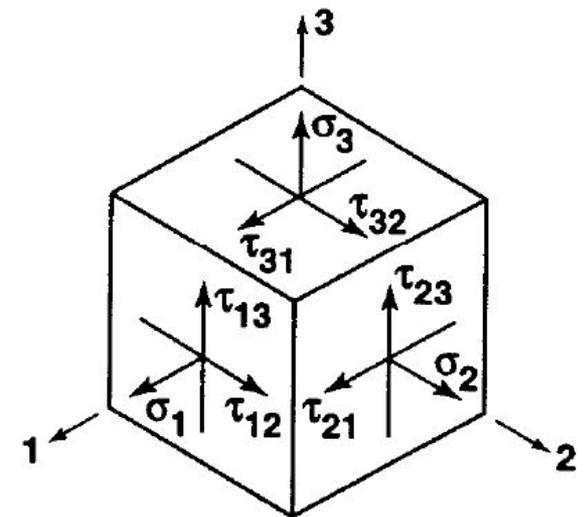
Традиционные конструкционные материалы (металлы) **однородны** и **изотропны**. Первое означает постоянство свойств по всему объёму, второе – постоянство свойств по всем направлениям.

Композиционные материалы, как правило, **неоднородны** и **анизотропны**.

**Анизотропия** – различие свойств материала в различных направлениях.

Частный случай анизотропии – **ортотропия**, т. е. наличие трёх взаимно перпендикулярных выделенных направлений в материале, вдоль которых механические свойства отличаются.

## СИСТЕМА КООРДИНАТ КМ





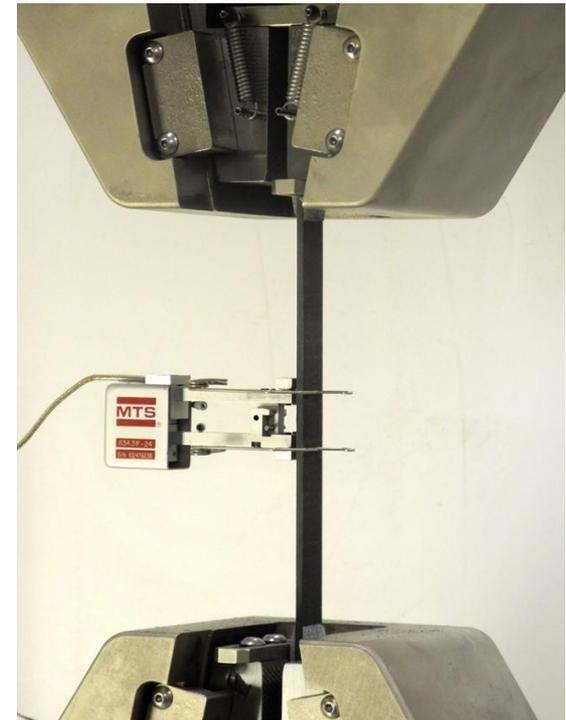
# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КМ. ИСПЫТАНИЯ

Исходными данными для проектирования композитных конструкций являются **механические характеристики материала**. Использование ряда известных критериев прочности показывает, что задание достоверных значений упругих и прочностных характеристик на начальном этапе разработки изделия оказывает существенное влияние на конечный результат проектирования.

Наиболее точным и надежным способом определения свойств материалов является **эксперимент**.

*Испытание – опытное определение количественных и (или) качественных свойств предмета испытаний как результата воздействий на него, при его функционировании, при моделировании предмета и (или) воздействий*

ГОСТ 16504-81





# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КМ. ИСПЫТАНИЯ

Цель проведения испытаний: получения сведений, необходимых для принятия решения о соответствии объекта испытаний заданным требованиям.

Качество испытания определяется достоверностью полученных сведений. Чем выше достоверность, тем выше качество.

Для современного уровня развития достаточным является получение результатов испытаний, которые обеспечивают заданные требования с 90% вероятностью попадания в 95% доверительный интервал (**В-базис**).

**А-базис** - обеспечение заданных требований с 99% вероятностью попадания в 95% доверительный интервал.





# ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ. ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

## ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ

### по виду воздействия:

- механические,
- климатические,
- термические,
- радиационные,
- электрические,
- электромагнитные,
- магнитные,
- химические, и т. п.;

### по назначению:

- исследовательские,
- контрольные,
- сравнительные;

### по условию и месту

#### проведения испытаний:

- лабораторные,
- стендовые,
- натурные,
- эксплуатационные;

### по результату воздействия:

- неразрушающие,
- разрушающие,
- испытания на стойкость,
- испытания на прочность,
- испытания на устойчивость.

**Испытания на прочность** – испытания, проводимые для определения значений воздействующих факторов, вызывающих выход значений характеристик свойств объекта за установленные пределы или его разрушение.



## ИСПЫТАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

**Программа испытаний** – документ, содержащий организационно-методическую информацию о проводимых исследованиях (общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний, формах представления информации)

**Методика испытаний** – документ, содержащий обобщённую информацию о методах испытаний и (или) измерений, условиях и средствах проведения испытаний, определяемых показателях и точности их измерения, оценке достоверности результатов.

**Опытный образец** – образец продукции, изготовленный по вновь разработанной рабочей документации для проверки путем испытаний соответствия его заданным техническим требованиям с целью принятия решения о возможности постановки на производство и (или) использования по назначению.

**Испытательное оборудование** – средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний.



## ИСПЫТАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

**Точность результатов испытаний** – свойство испытаний, характеризующее близостью результатов испытаний к действительным значениям характеристик объекта, в определённых условиях испытаний.

**Воспроизводимость результатов испытаний** – характеристика результатов испытаний, определяемая близостью результатов повторных испытаний объекта.

**Данные испытаний** – регистрируемые при испытаниях значения характеристик свойств объекта и (или) условий испытаний, наработок, а также других параметров, являющихся исходными для последующей обработки.

**Результат испытаний** – оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям по данным испытаний, результаты анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний.

**Протокол испытаний** – документ, содержащий необходимые сведения об объекте испытаний, применяемых методах, средствах и условиях испытаний, результаты испытаний, а также заключение по результатам испытаний, оформленный в установленном порядке.

Механические свойства композитов складываются в результате взаимодействия компонентов. Податливая матрица, заполняющая межволоконное пространство, обеспечивает совместную работу отдельных волокон за счёт собственной жёсткости и взаимодействия, существующего на границе раздела «матрица – волокно».

Следовательно, механические характеристики полимерных композитов, армированных волокнами, *зависят* главным образом *от трёх факторов*:

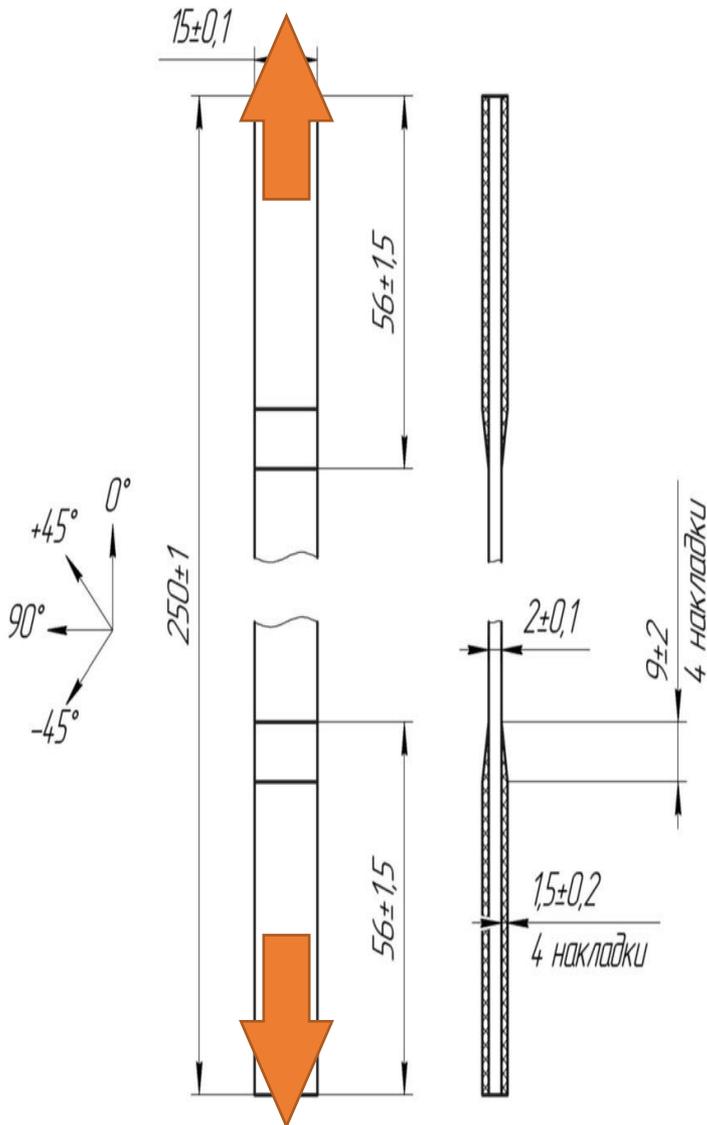
- прочности и упругости волокна;
- прочности и химической стабильности смолы;
- прочности связи между смолой и волокном, от которой зависит эффективность передачи напряжения через поверхность раздела.

**Каждый из перечисленных факторов может влиять на механические свойства композитов.**

Для определения базового набора свойств КМ, необходимых и достаточных для проектирования, проводятся следующие виды испытаний: растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб + испытания на межслоевую прочность.



# ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

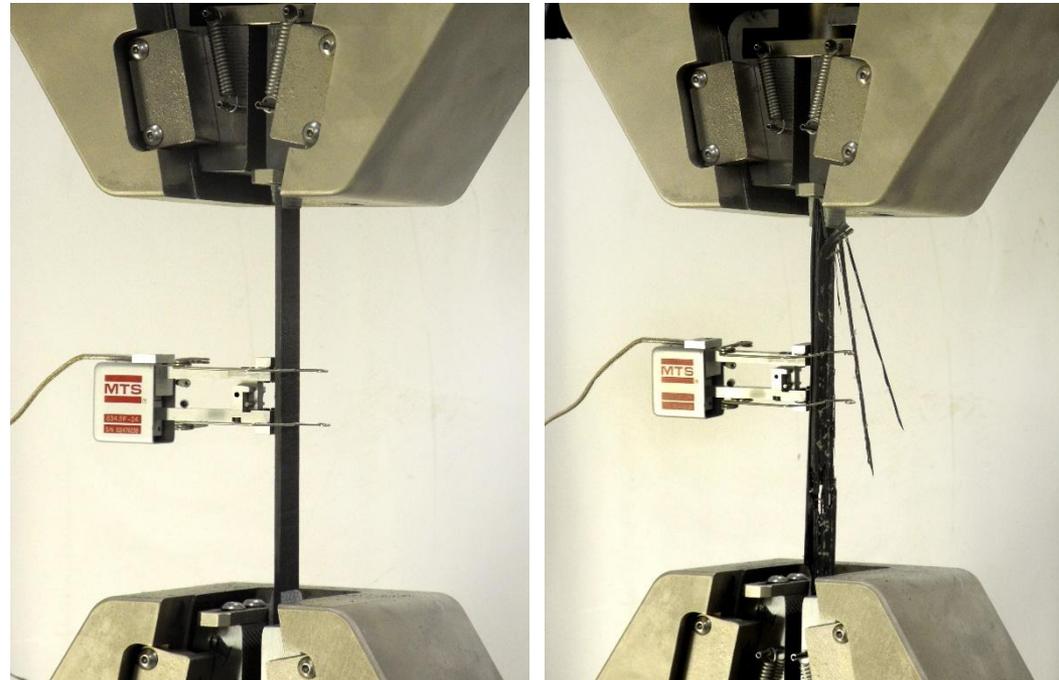


## И D 3039M

Method for  
Properties  
Matrix  
Composite  
Materials

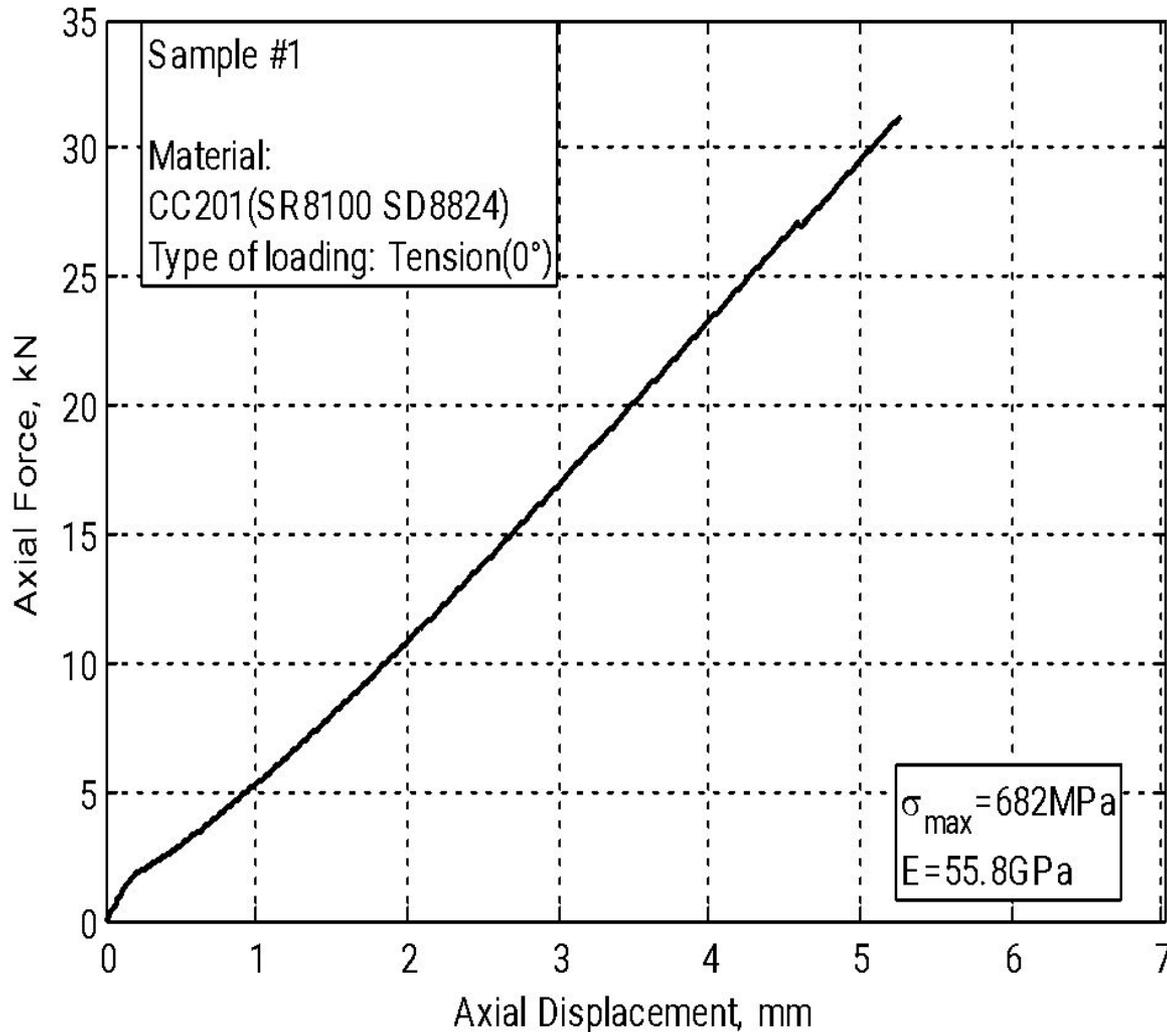
## Определяемые величины:

- ✓ Предельная деформация
- ✓ Предельные напряжения  $\sigma_{11}^+$ ,  $\sigma_{22}^+$
- ✓ Модуль упругости  $E_{11}$ ,  $E_{22}$
- ✓ Коэффициент Пуассона  $\nu_{12}$





# ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ



$$\sigma = \frac{P}{S} = \frac{P}{b\delta}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1}$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$



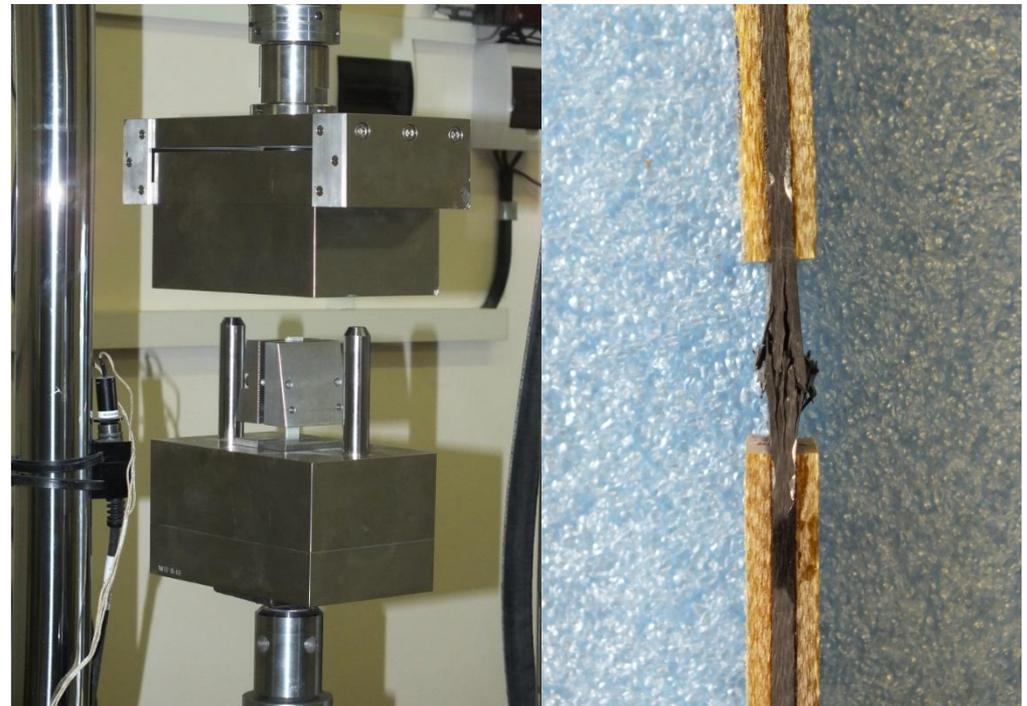
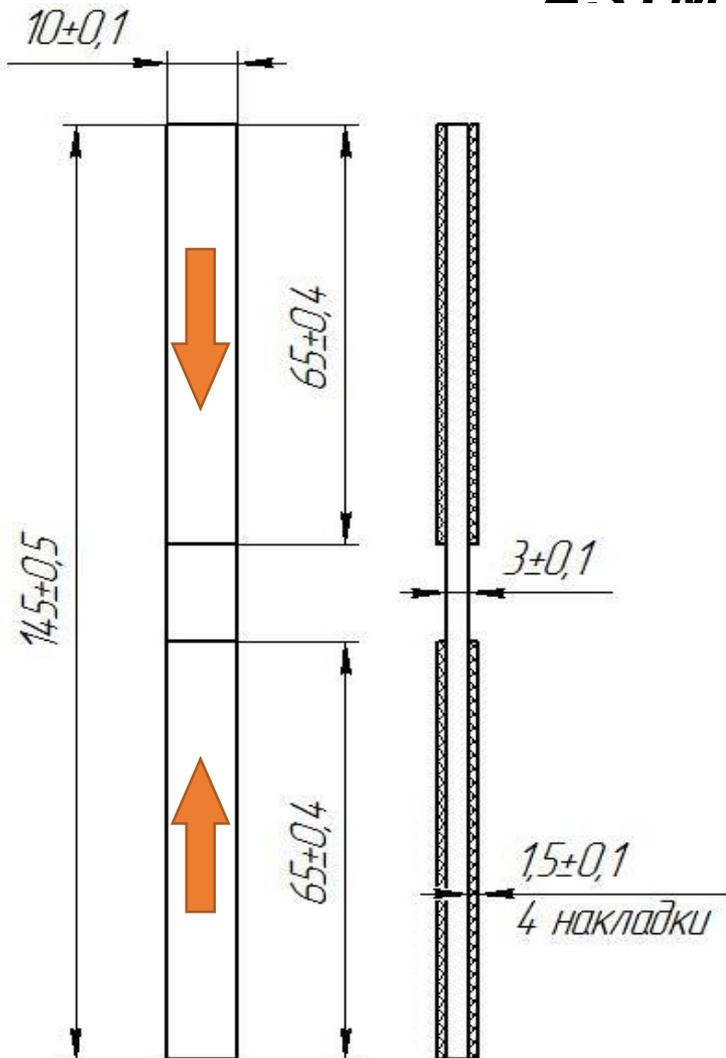
# ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ

## Δ *ASTM D 3410M*

### Определяемые величины:

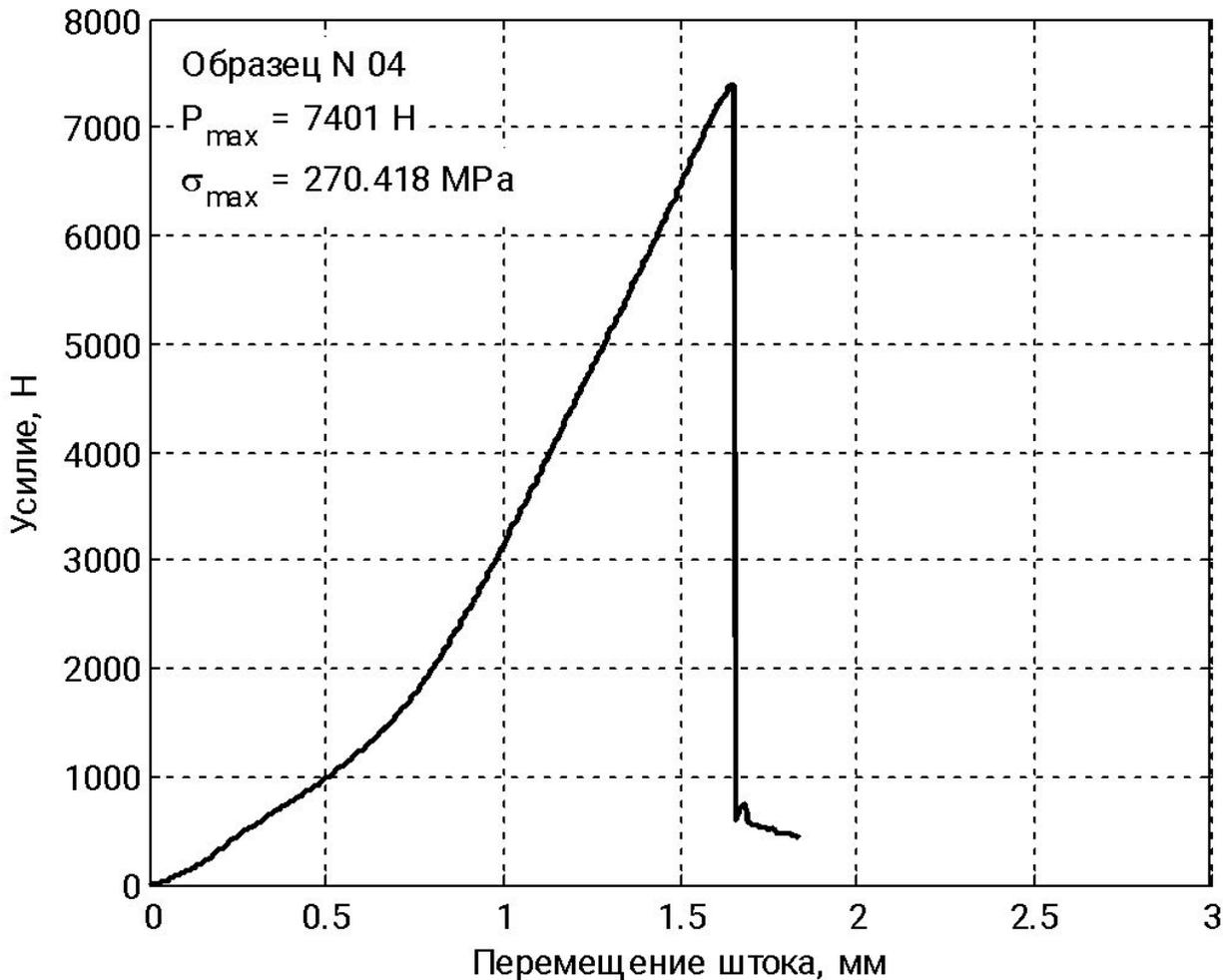
Method for  
Compression  
of  
Matrix  
Composite Materials

- ✓ *Пределная деформация*
- ✓ *Пределные напряжения  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$*
- ✓ *Коэффициент Пуассона  $\nu_{12}$*





# ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ



$$\sigma = \frac{P}{S} = \frac{P}{b\delta}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1}$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$



# ИСПЫТАНИЯ НА ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

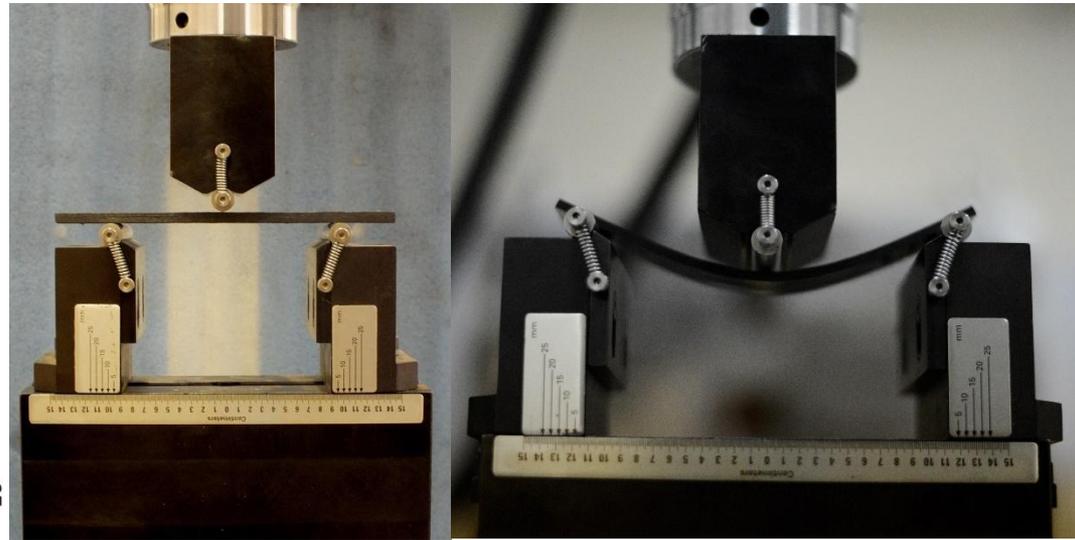
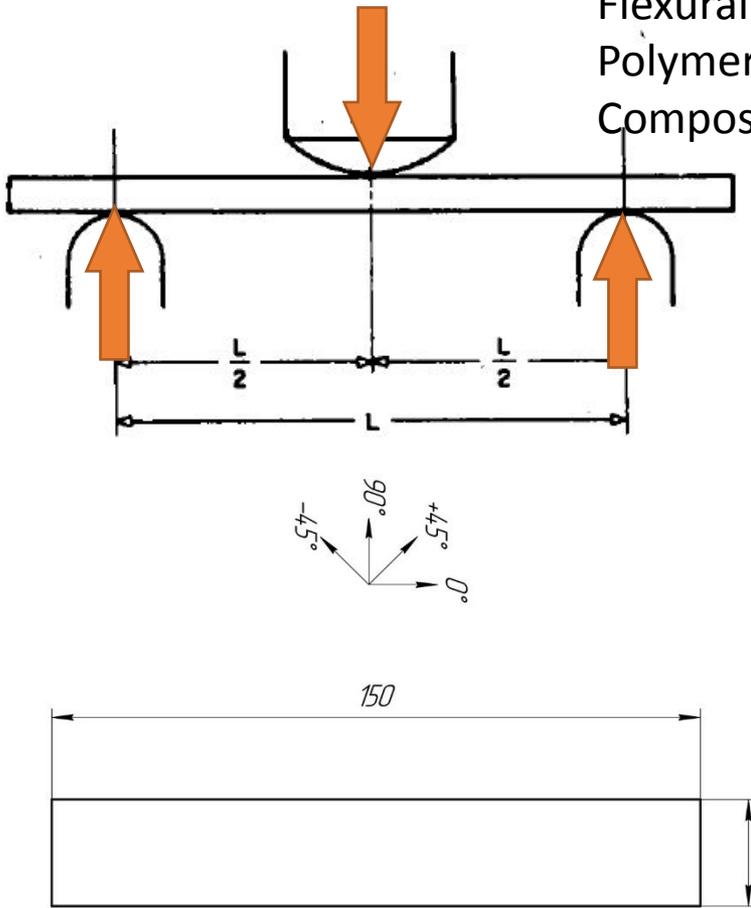
## ASTM D 790M

Test Method for  
Flexural Properties of  
Polymer Matrix  
Composite Materials



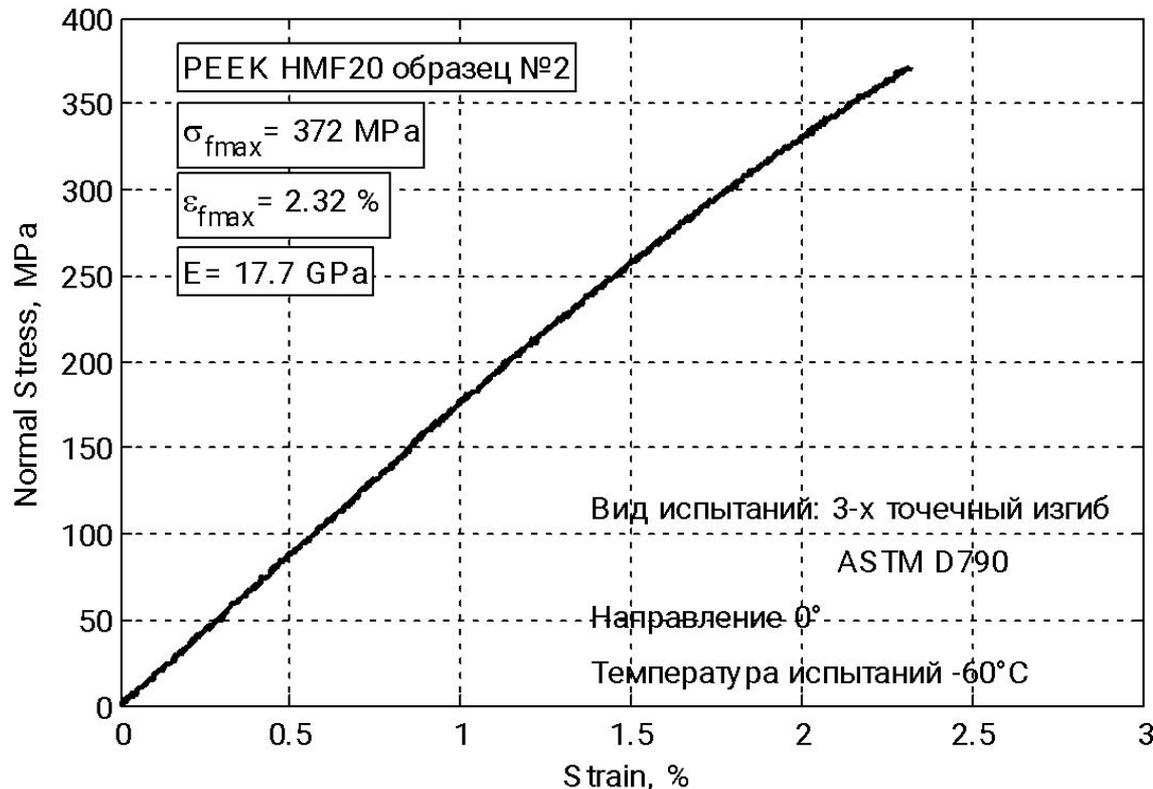
Определяемые величины:

*Предельная деформация*  
*Предел изгибной прочности  $\sigma_f$*   
*Модуль упругости*





# ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ



$$E_{изг} = \frac{\sigma}{\epsilon_{изг}}$$
$$\sigma = \frac{3LF}{2b\delta^2}$$
$$\epsilon = \frac{6z\delta}{L^2}$$

$z$  – прогиб образца (соответствует перемещению штока гидроцилиндра),  
 $\delta$  – толщина образца,  
 $L$  – расстояние между опорами испытательной оснастки  
 $F$  – сила, действующая на образец,  
 $b$  – ширина образца.



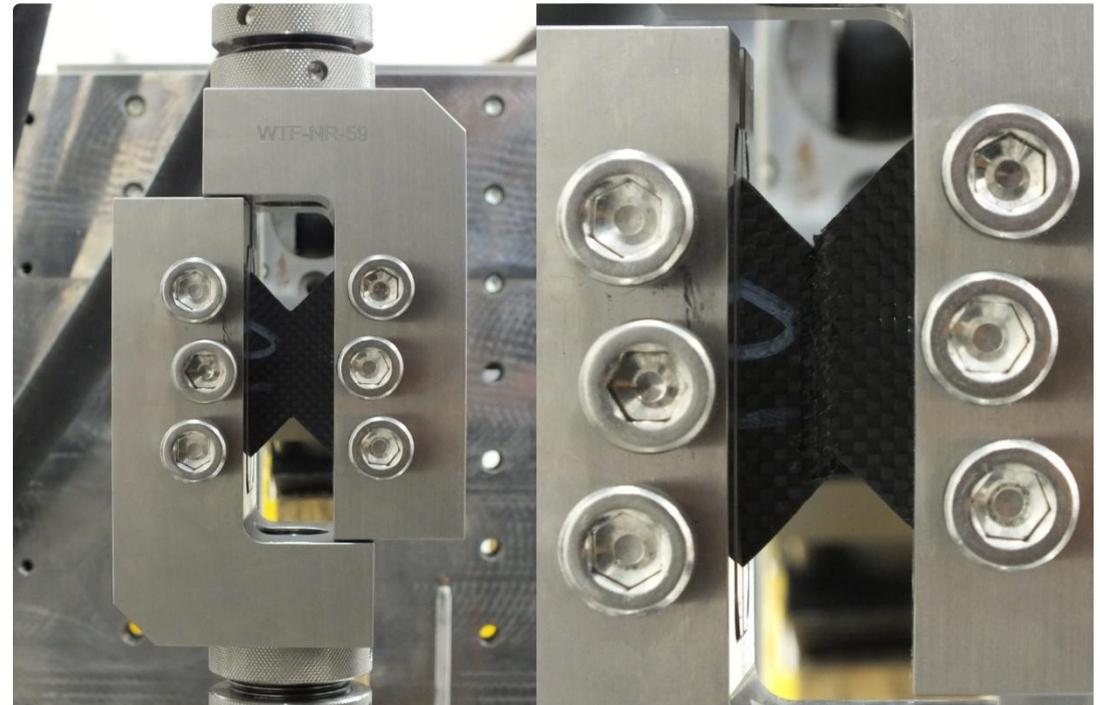
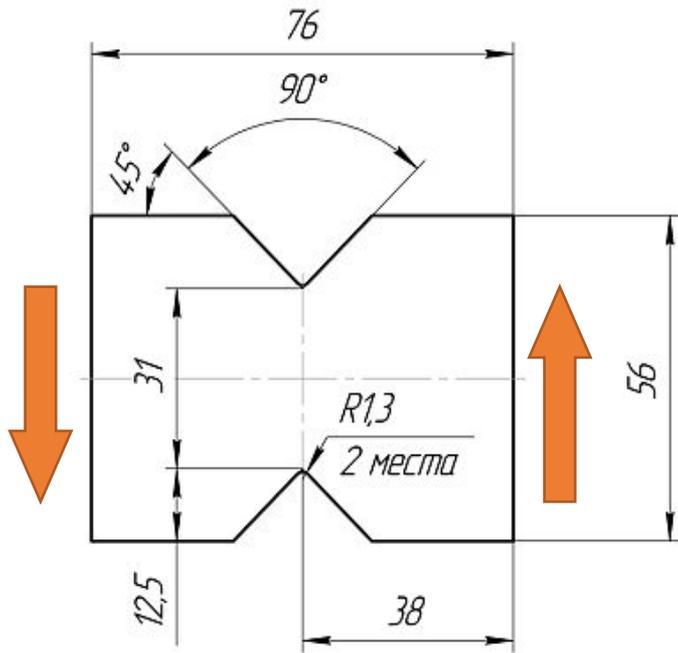
# ИСПЫТАНИЯ НА СДВИГ

## ASTM D 7078M

Method for  
Properties of  
Matrix  
Site Materials

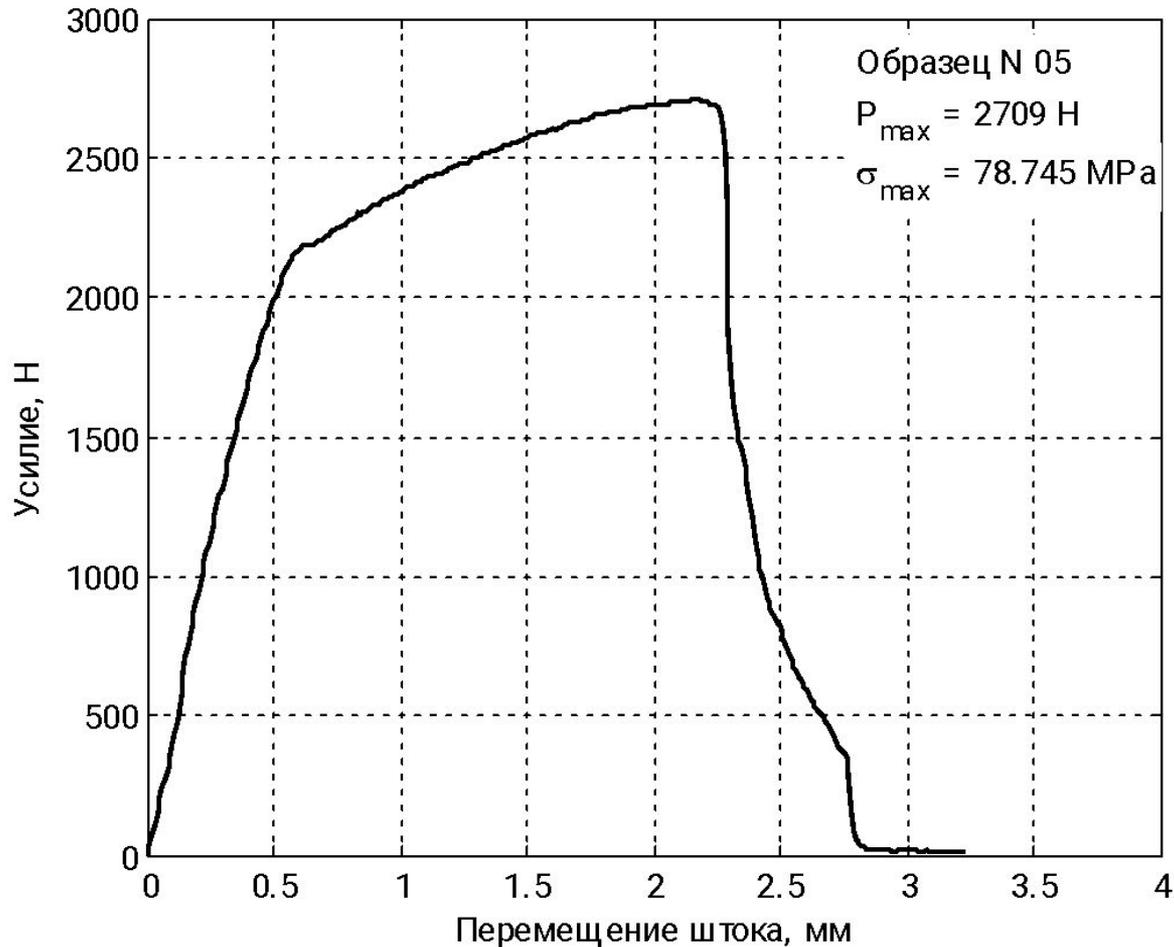
### Определяемые величины:

- ✓ Модуль сдвига в плоскости слоев  $G_{12}$
- ✓ Предельные напряжения  $\tau_{12}$
- ✓ Предельные деформации  $\gamma_{12}$





# ИСПЫТАНИЯ НА СДВИГ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ



## ASTM D 7078

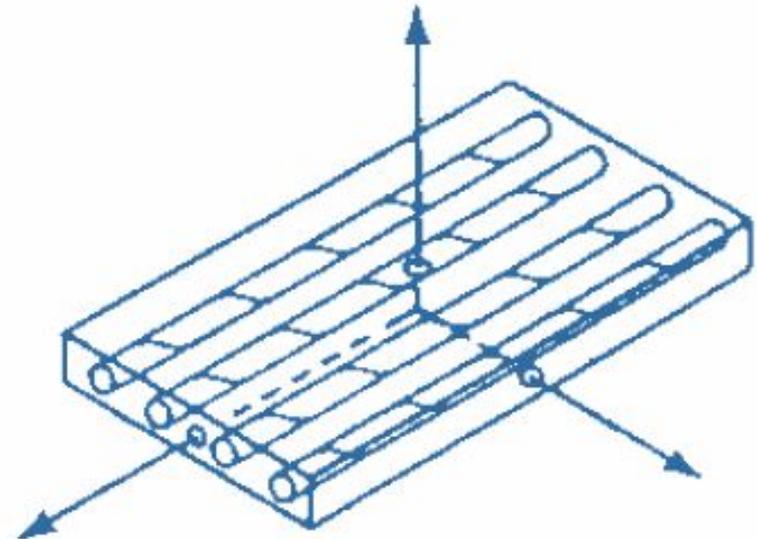
$$E_{12} = \frac{\tau}{\gamma}$$

$$\tau = \frac{P}{2b\delta}$$



## Часть 2

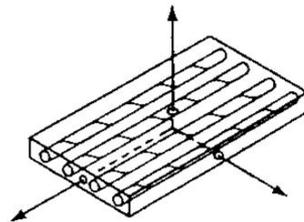
# Проектирование конструкций из КМ



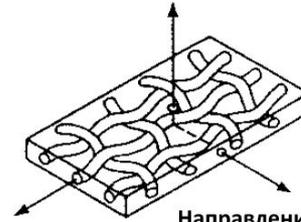


# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЕВ КМ

Под **слоем** композиционного материала понимается плоский или криволинейный набор однонаправленных волокон или ткани, расположенных в матрице.



СЛОЙ С ОДНОНАПРАВЛЕННЫМИ ВОЛОКНАМИ



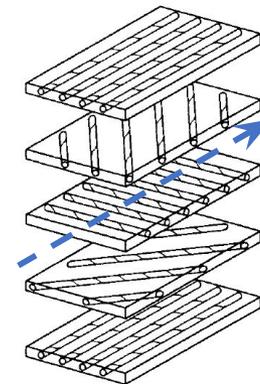
Направление утка

Направление основы

СЛОЙ С ПЛЕТЁНЫМИ ВОЛОКНАМИ (ТКАНЬЮ)

Под **ламинатом** или **пакетом слоёв** композиционного материала понимается совокупность слоёв различной ориентации, объединенных между собой.

*Пакет слоёв  
в «разобранном»  
виде:*



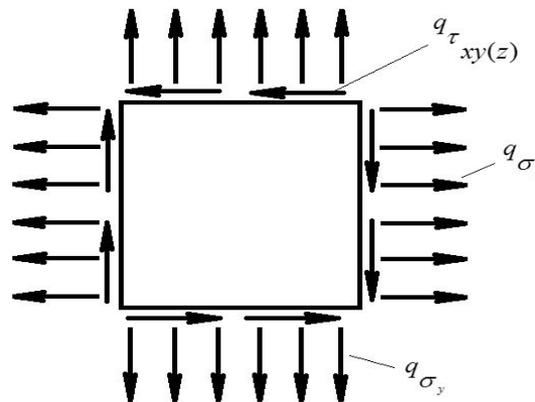
**Направлени  
е  
основы**



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЕВ КМ

При проектировании конструкций из композиционных материалов необходимо располагать следующими данными:

1. *Расчетными нагрузками*, действующими на элемент конструкции в следующем виде:



$q_{\sigma_x}$	- поток нормальных напряжений, действующих в направлении оси X, Н/мм;
$q_{\sigma_y}$	- поток нормальных напряжений, действующих в направлении оси Y, Н/мм;
$q_{\tau_{xy}(z)}$	- поток касательных напряжений, действующих в плоскостях XY или XZ, Н/мм;
X, Y, Z	- самолетные оси.



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЕВ КМ

Зачастую на практике конструкции из композиционных материалов имеют повышенные значения коэффициента вариации, характеризующего нестабильность несущих свойств конструкции. Поэтому значения расчетных нагрузок необходимо увеличить на дополнительный коэффициент безопасности  $f_{\partial on} = 1,25$

$$q_{\sigma_x}^{KM} = q_{\sigma_x} \times f_{\partial on} \square$$

$$q_{\sigma_y}^{KM} = q_{\sigma_y} \times f_{\partial on} \square$$

$$q_{\tau_{xy(z)}}^{KM} = q_{\tau_{xy(z)}} \times f_{\partial on}$$



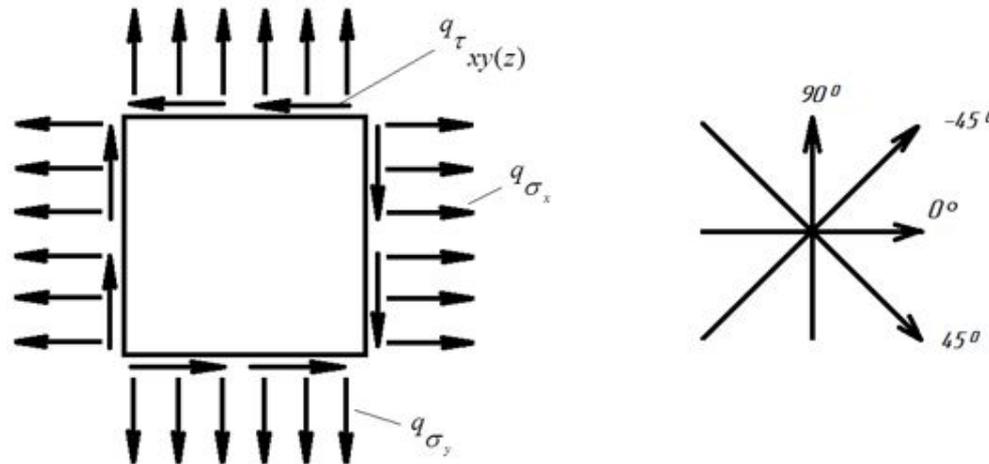
2. *Паспортные данные* на композиционный материал при нормальных и эксплуатационных температурах и влажности:

- $[\sigma_{11}]^+$  - предел прочности при растяжении вдоль волокон ( $0^\circ$ ), МПа;
- $[\sigma_{22}]^+$  - предел прочности при растяжении поперек волокон ( $90^\circ$ ), МПа;
- $[\sigma_{11}]^-$  - предел прочности при сжатии вдоль волокон ( $0^\circ$ ), МПа;
- $[\sigma_{22}]^-$  - предел прочности при сжатии поперек волокон ( $90^\circ$ ), МПа;
- $[\tau_{12}]$  - предел прочности при сдвиге вдоль направлений  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , МПа;
- $E_{11}$  - продольный модуль упругости при растяжении (сжатии) вдоль направления  $0^\circ$ , ГПа;
- $E_{22}$  - продольный модуль упругости при растяжении (сжатии) вдоль направления  $90^\circ$ , ГПа;
- $G_{12}$  - модуль сдвига в плоскости, ГПа;
- $\nu_{12}$  - коэффициент Пуассона;
- $\delta_i$  - толщина одного слоя, мм;
- $\gamma$  - удельный вес,  $\text{г/см}^3$ .



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЕВ КМ

3. *Схема ориентации основы или ткани.* На поле чертежа необходимо указать оси, направление которых определяют ориентацию основы однонаправленного КМ (рисунок 3.2):



*Пример отображения направления осей основы или ткани*

Ось с направлением  $0^\circ$  для большинства слоев должна совпадать с самолетными осями X, Y, Z или с направлением максимальной нагрузки. В любом случае на поле чертежа обязательно указывается какому направлению соответствует ось  $0^\circ$  (ось 1).



# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЕВ КМ

**Необходимая толщина слоев КМ** в направлении  $0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ$  от расчетных нагрузок определяется следующим образом:

$$\delta^0 = \frac{q_{\sigma_x}^{KM}}{[\sigma_{11}]}, \text{ мм} \quad (1)$$

$$\delta^{90} = \frac{q_{\sigma_y}^{KM}}{[\sigma_{22}]}, \text{ мм} \quad (2)$$

$$\delta^{\pm 45} = \frac{q_{\tau_{xy}}^{KM}}{[\tau_{\pm 45}]_{\text{эксн}}}, \text{ мм} \quad (3)$$

**Количество слоев КМ** определяется в соответствии с данными выражениями:

$$n_{\text{сл}}^0 = \frac{\delta^0}{\delta_i}, \quad (4)$$

$$n_{\text{сл}}^{90} = \frac{\delta^{90}}{\delta_i}, \quad (5)$$

$$n_{\text{сл}}^{\pm 45} = \frac{\delta^{\pm 45}}{\delta_i}, \quad (6)$$

где  $\delta_i$  - толщина монослоя, мм.

Полученные значения  $n_{\text{сл}}^0$  и  $n_{\text{сл}}^{90}$  необходимо округлить до ближайшего большего числа, а  $n_{\text{сл}}^{\pm 45}$  - до ближайшего числа, кратного 2.





## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАКЕТА СЛОЕВ КМ

Для пакета слоев, помимо указания направлений армирования, важное значение имеет также *последовательность укладки слоев по его толщине*.

В целях наглядности, для указания структуры пакета слоев композиционного материала («ламината»), часто применяется следующая система обозначений.

- Слои обозначаются в соответствии с направлением выкладки и записываются в квадратных скобках, начиная со слоя, лежащего на поверхности ламината.
- Если подряд укладывается несколько слоев с одинаковым направлением волокон, их число записывается в виде нижнего индекса. Например, запись  $[0 / 90_2]$  обозначает пакет, состоящий из трех слоев: верхний слой имеет направление 0 градусов, два последующих слоя уложены под 90 градусов к направлению оси «х» пакета; ламинат со структурой  $[0 / 90_2 / \pm 45_3]$  отличается от предыдущего наличием трех групп слоев с армированием  $\pm 45$ .
- Если в пакете, помимо однонаправленных, используются слои ткани, то последние обозначаются знаком верхнего подчеркивания.
- Если пакет имеет симметричную структуру относительно своей срединной поверхности, то используется сокращенная запись, в которой симметрия обозначается индексом «S» за знаком квадратных скобок. Например, вместо записи  $[0 / \pm 45_3 / 90_2 / \pm 45_3 / 0]$  используют короткую запись вида  $[0 / \pm 45_3 / 90]_S$ .