

**ИСПЫТАНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И
КОНСТРУКЦИЙ**
(часть 2)

Преподаватель доц. Таирова Л.П.

Лекции 5÷6

Технические особенности определения характеристик упругости и прочности

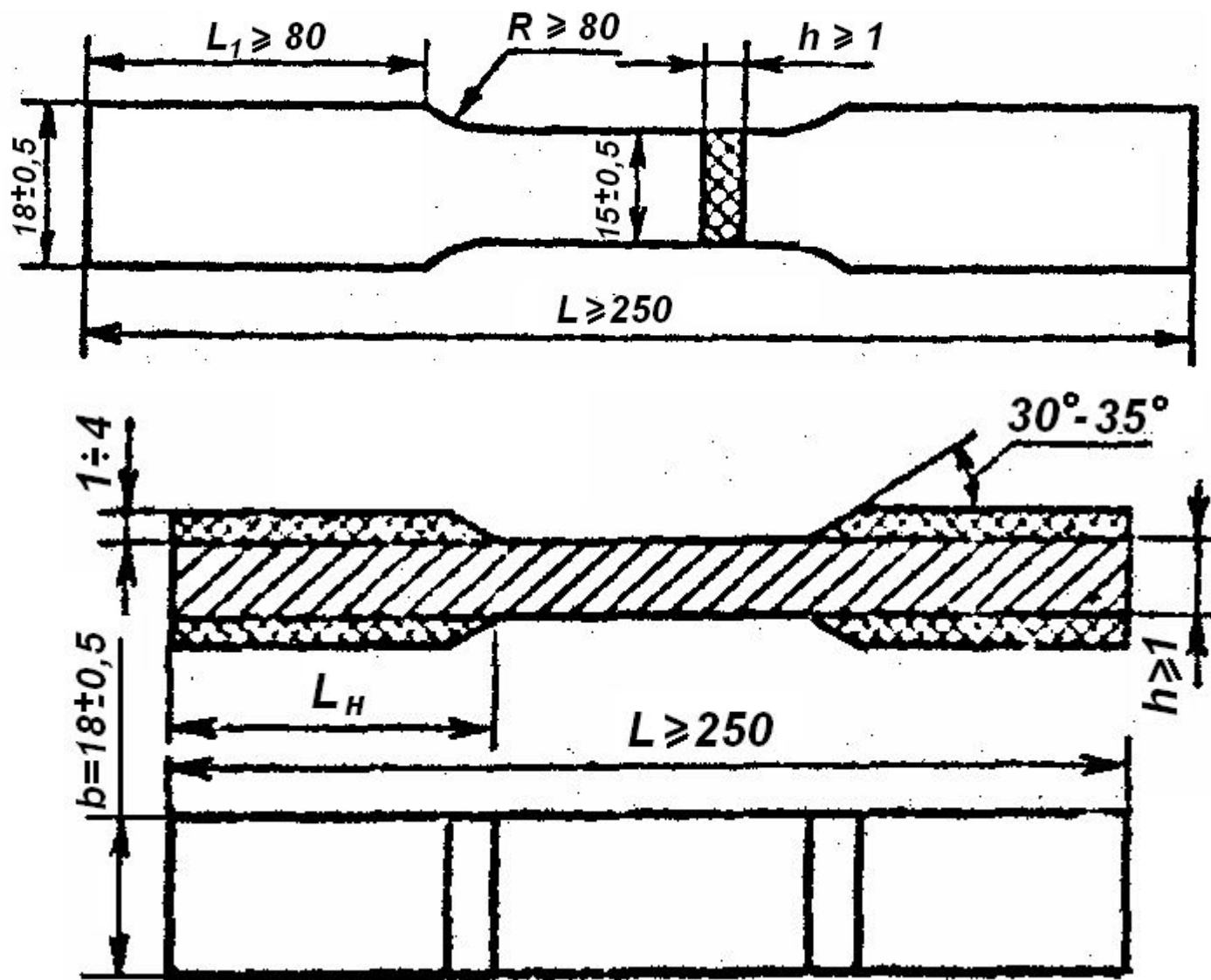
- Типы образцов (форма, размеры, подкрепление)
- Особенности закрепления образцов
- Основные источники погрешностей

Основные типы образцов для определения характеристик упругости и прочности

- Плоские образцы-полоски и образцы-стержни со схемами армирования относительно продольной оси: 0° , 90° , $\pm\phi^\circ$ и др.
- Трехслойные образцы со схемами армирования обшивок: 0° , 90° , $\pm\phi^\circ$ и др.
- Трубчатые образцы со схемами армирования относительно продольной оси: 90° , $\pm\phi^\circ$ и др.
- Кольцевые образцы с направлением волокон вдоль окружности (в основном)

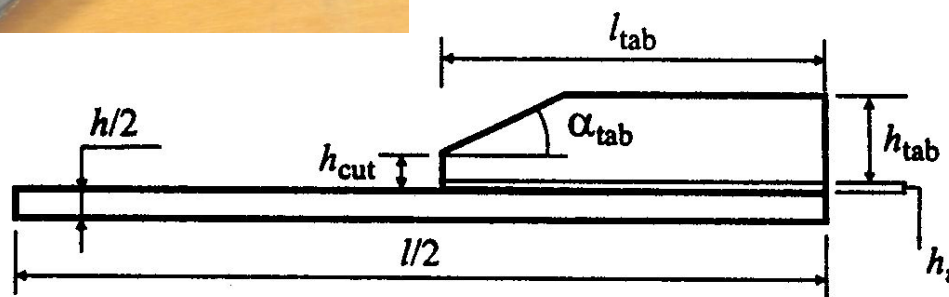
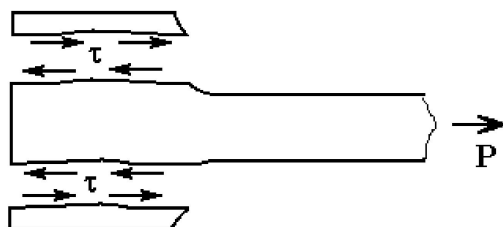
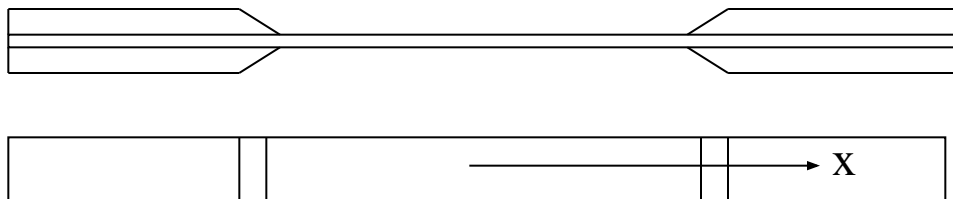
Плоские образцы из многослойных КМ - растяжение

(ГОСТ 25.601-80)

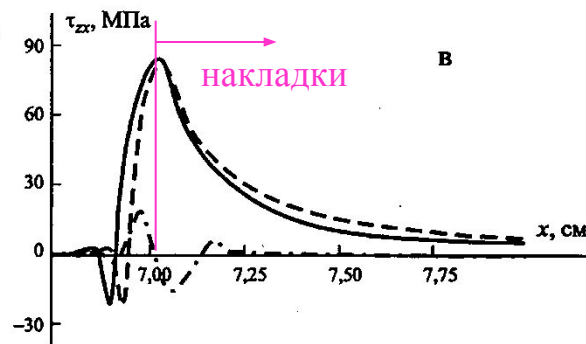
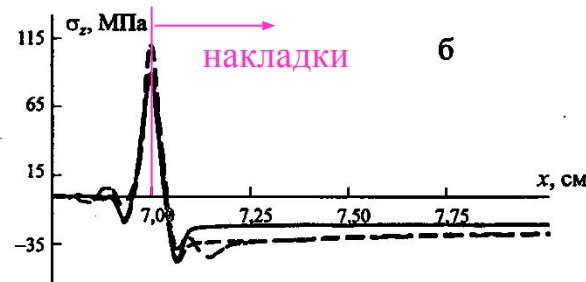
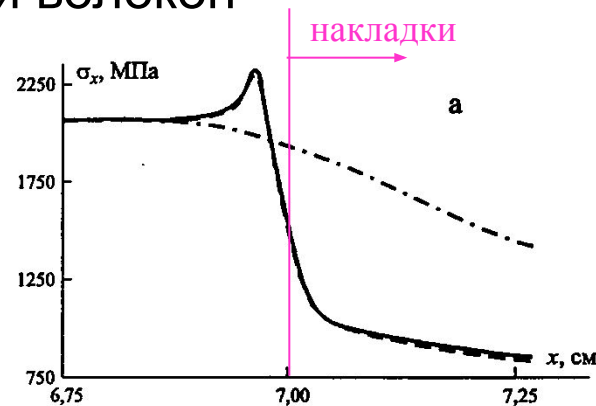


Особенности испытаний плоских однонаправленных композитов в направлении волокон

Образец-полоска с накладками



Минимальная концентрация напряжений — при $\alpha_{\text{таб}} < 10^\circ$



Распределения продольных σ_x (а), поперечных σ_z (б) и касательных τ_{zx} (в) напряжений вдоль срединной (---) и внешней (--- и —) поверхностей образца. Расчеты по упрощенной (--- и ---) и уточненной (—) схемам нагружения

Некоторые рекомендации по испытаниям на растяжение ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

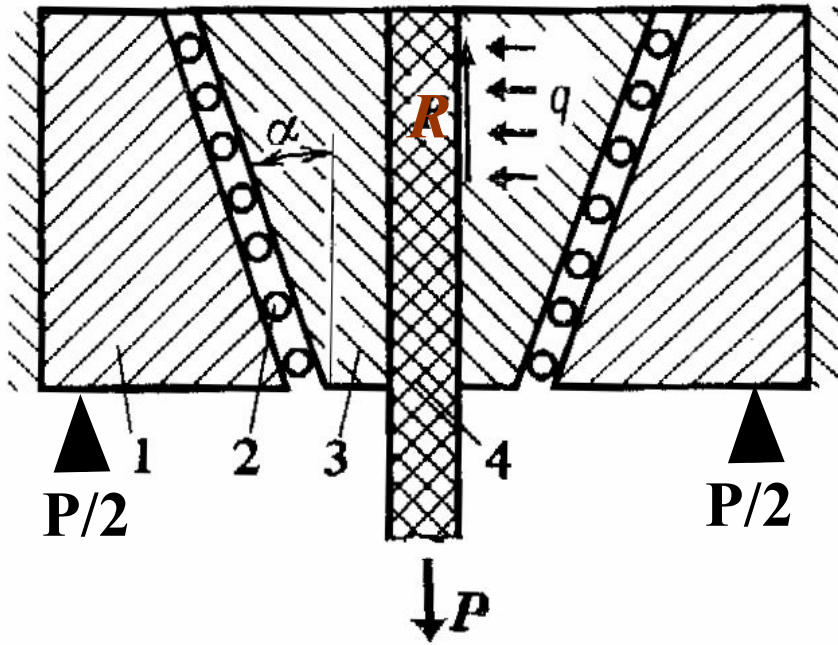
Для снижения концентрации напряжений вблизи края накладок рекомендуется

- использовать накладки из материала с модулем упругости около 15 ГПа (например, стеклопластик, армированный тканью);
- предпочтительное значение угла скашивания накладок α – не более 10° ;
- для приклеивания накладок предпочтительно использование низко модульного полиуретанового клея.

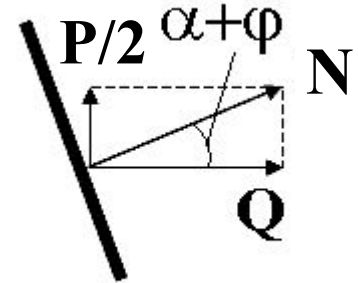
Расчеты и эксперименты показывают:

- изменение толщины накладок от 2 мм до 0,5 мм мало влияет на уровень концентрации напряжений вблизи краев накладок;
- изменение длины накладок от 40 мм до 100 мм мало влияет на уровень концентрации напряжений вблизи краев накладок, однако уменьшение длины накладок менее 60 мм может привести к разрушению накладок;
- учет вязкоупругих свойств связующего и клеевого слоя приводит к снижению концентрации напряжений вблизи краев накладок.

Стандартные самозаклинивающие захваты



- 1 - корпус захвата,
- 2 - роликподшипники,
- 3 - подвижные губки,
- 4 - образец



$$qs_{\text{захв}} = Q = \frac{P}{2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}, \quad R = Qf$$

$f \sim 0,3$ – коэффициент трения в захватах,

$\varphi = (1 \div 3)^\circ$ – приведенный угол трения качения

Условие отсутствия выскальзывания:

$$P = F_x^+ s_{\text{раб.з}} \leq 2R = 2qs_{\text{захв}} f = \frac{2Pf}{2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}, \quad \frac{f}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} \geq 1$$

Условие отсутствия раздавливания в захватах:

$$q = \frac{F_x^+ s_{\text{раб.з}}}{2s_{\text{захв}} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} < F_z^-$$

Условие отсутствия разрушения от сдвига

$$\frac{R}{s_{\text{захв}}} = \frac{F_x^+ s_{\text{раб.з}} f}{2s_{\text{захв}} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)} < F_{xz}$$

Легче выполнить при наличии прокладок

Специальные захваты

Технические характеристики:

- максимальная разрушающая нагрузка 35 кН;
- максимальная толщина образца в захватах (вместе с накладками) 10 мм;
- максимальная длина образца 250 мм;
- длина заземленных концов от 30 мм до 80 мм.

- 1 – направляющие выступы (центрирование);
- 2 – страховочный стержень или пластина;
- 3 – центрирующий штифт;
- 4 – нагружение через серьги (шарниры в двух плоскостях).

Захваты во время закрепления образца



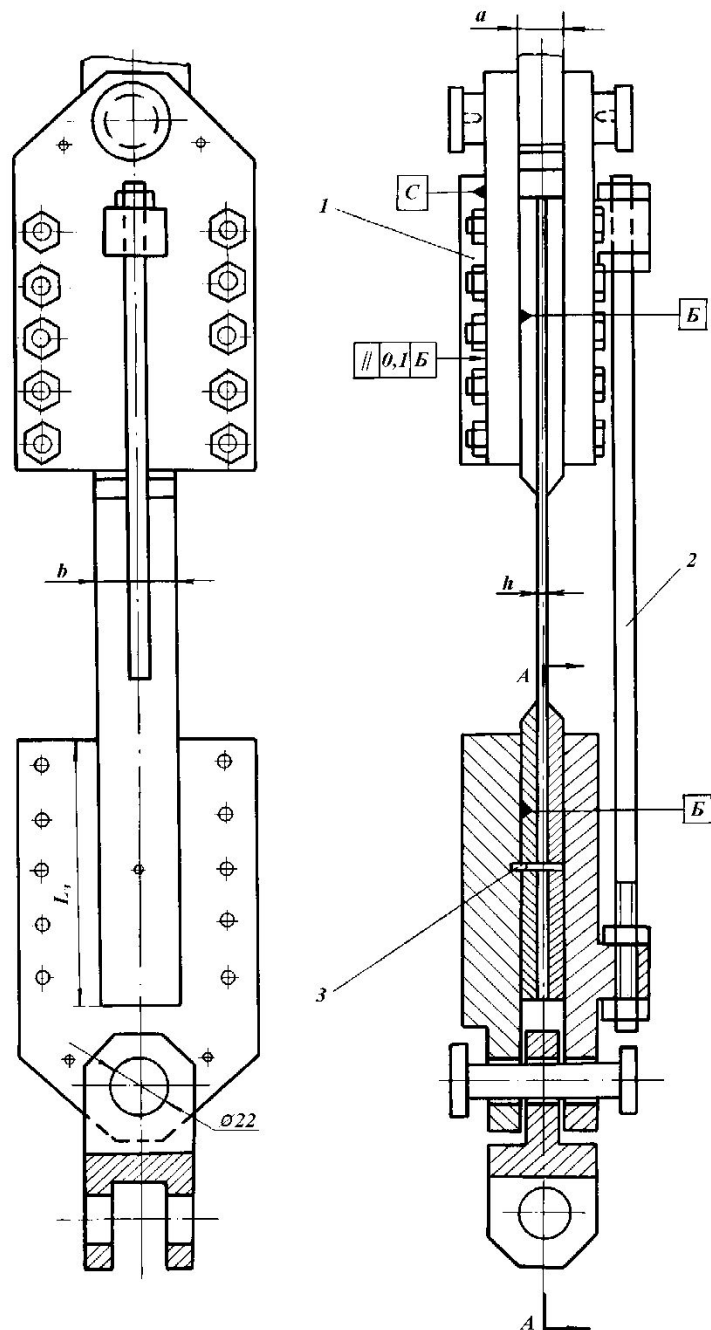
Основные достоинства:

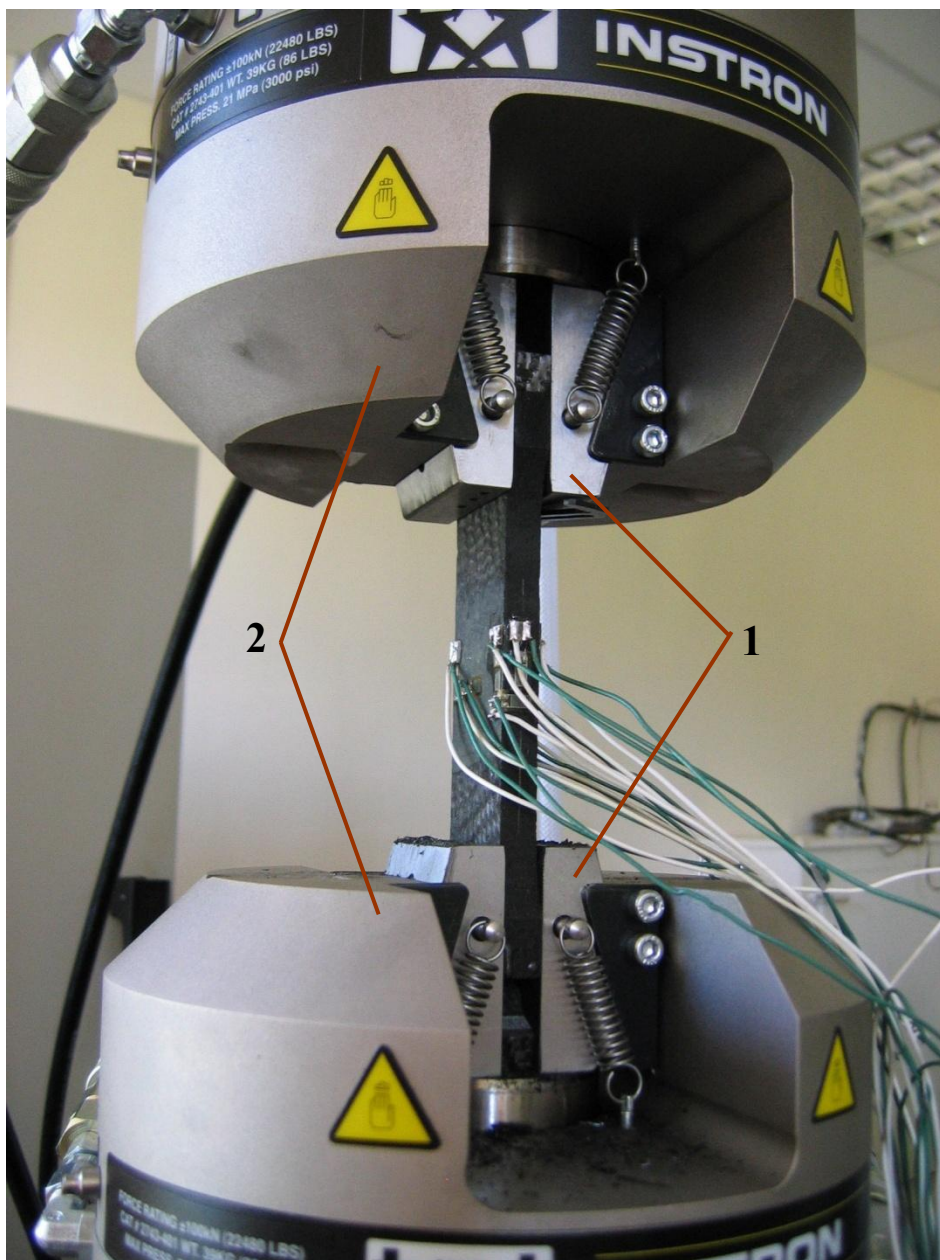
- высокая точность центрирования образца,
- предотвращение от повреждения при установке в машину.

Недостаток:

- увеличенная трудоемкость закрепления образца

A-A





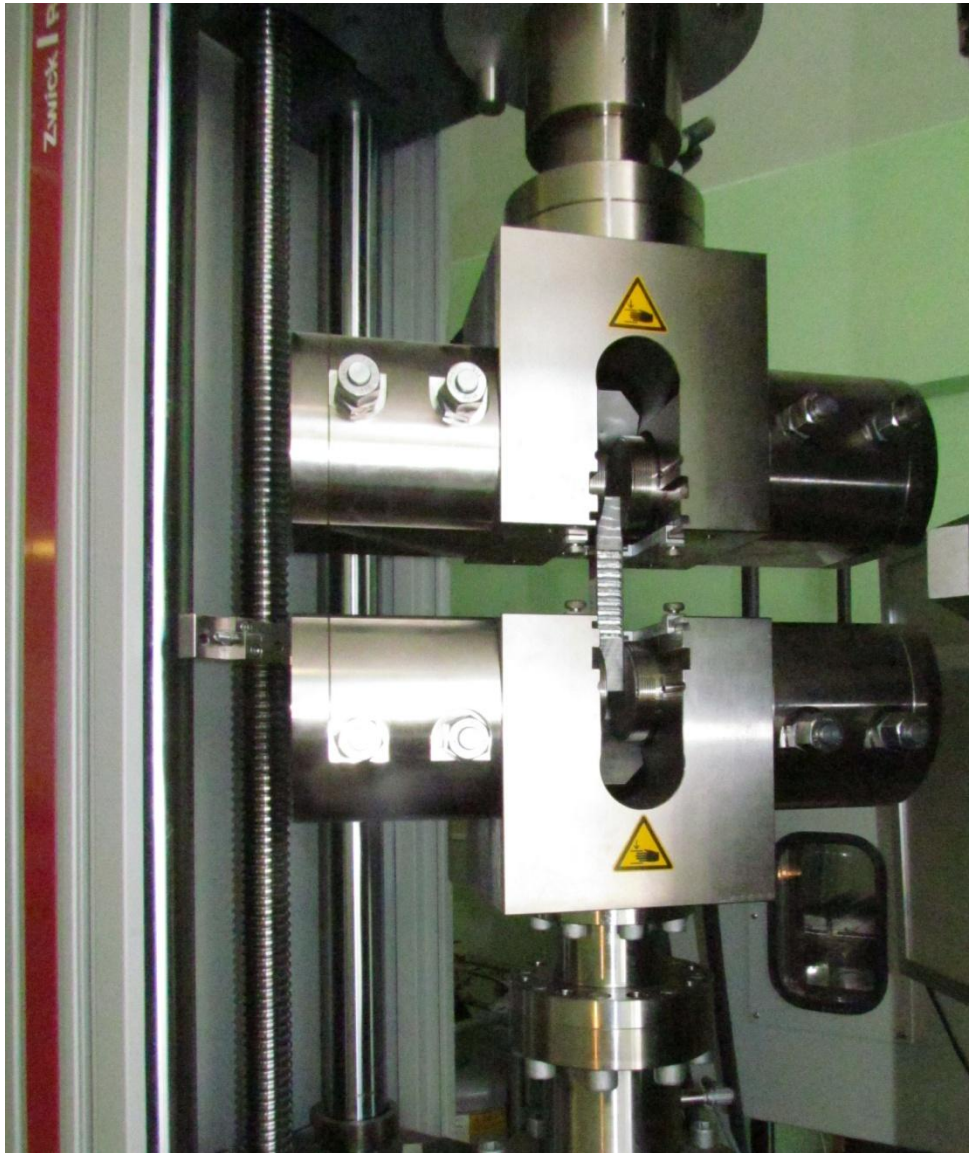
Технические характеристики:

- максимальная разрушающая нагрузка 100 кН;
- максимальное давление в захватах 200 бар;
- максимальная толщина образца в захватах (вместе с накладками) 15 мм;
- максимальная длина заземленных концов 55 мм.

Нет жесткой связи между приложенной к образцу нагрузкой и давлением в захватах

При закреплении образца смещаются относительно образца наружные части захватов 2, а внутренние 1 остаются неподвижными, что предохраняет образец от повреждения (не создает существенных продольных сжимающих нагрузок при закреплении образца).

Гидравлические захваты испытательной машины Zwick /Roell (предельные нагрузки 100 кН, 1000 Нм)



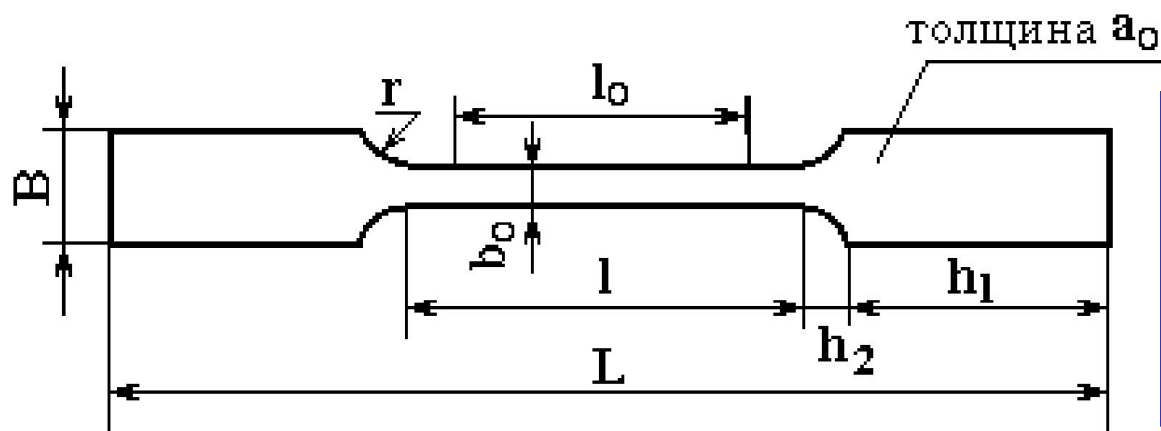
Пульт
управления
захватами

Технические характеристики:

- максимальная разрушающая нагрузка 100 кН;
- максимальное давление в захватах 460 бар;
- максимальная толщина образца в захватах (вместе с накладками) 60 мм;
- максимальная длина защемленных концов 80 мм.

Недостаток – нагружение образца сжимающими нагрузками при закреплении

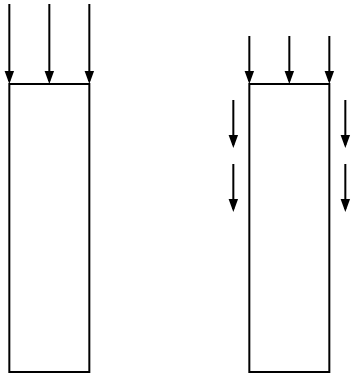
Сравнительные особенности плоских образцов из металлов и армированных пластиков для испытаний на одноосное растяжение



Рекомендации ГОСТ 25.601
наиболее актуальны
при испытаниях
однонаправленных композитов
вдоль волокон

Стандарт	Материал	Размеры (мм)						
		B	L	b_0	l_0	r	h_1	a_0
ГОСТ 11701-84	Металлы (листовые)	20	170-190	12,5	50	25-40	40	Толщ. матер.
ГОСТ 11262-76	Пластмассы	20	150	10	60	≥ 60	≥ 20	3÷4
ГОСТ 25.601-90	Композиты (прессов-е)	18	>250	15	≥ 70	≥ 80	≥ 80	≤ 2

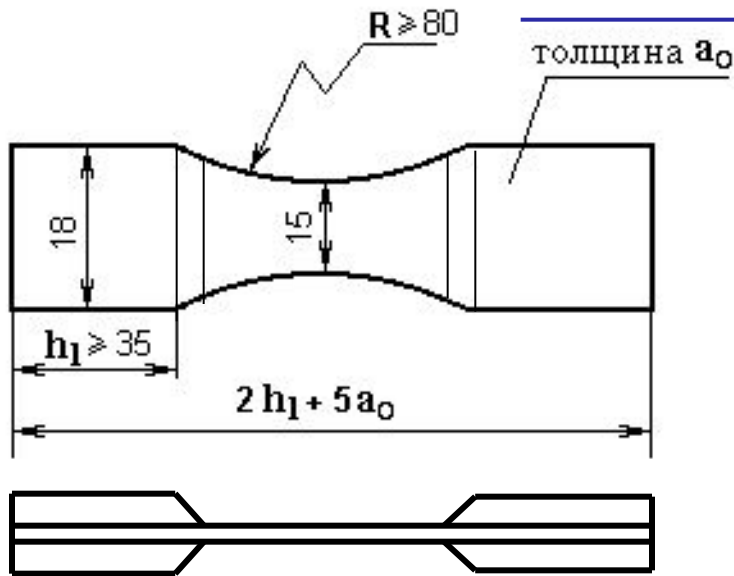
Сжатие плоских образцов из композитов

Сложность:

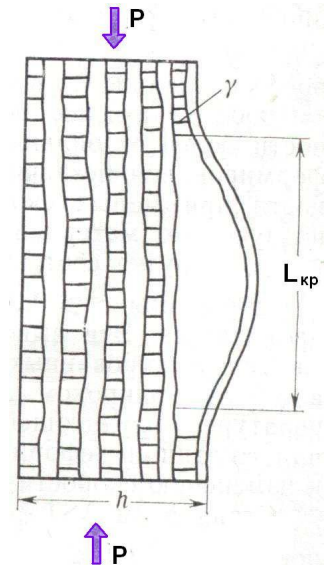
- смятие торцов;
- общая потеря устойчивости;
- местная потеря устойчивости.

ГОСТ 25.602-80: Высота образца зависит от толщины (из-за опасности потери устойчивости). Например, при $t = 3-4$ мм, $h_1 = 40$ мм, расстояние между захватами 15-20 мм

$$\sigma_{кр}^M \approx 3,85 E_x \left(\frac{\gamma}{E_{кр} L} \right)^{\frac{2}{5}} - \text{критические напряжения при местной потере устойчивости}$$



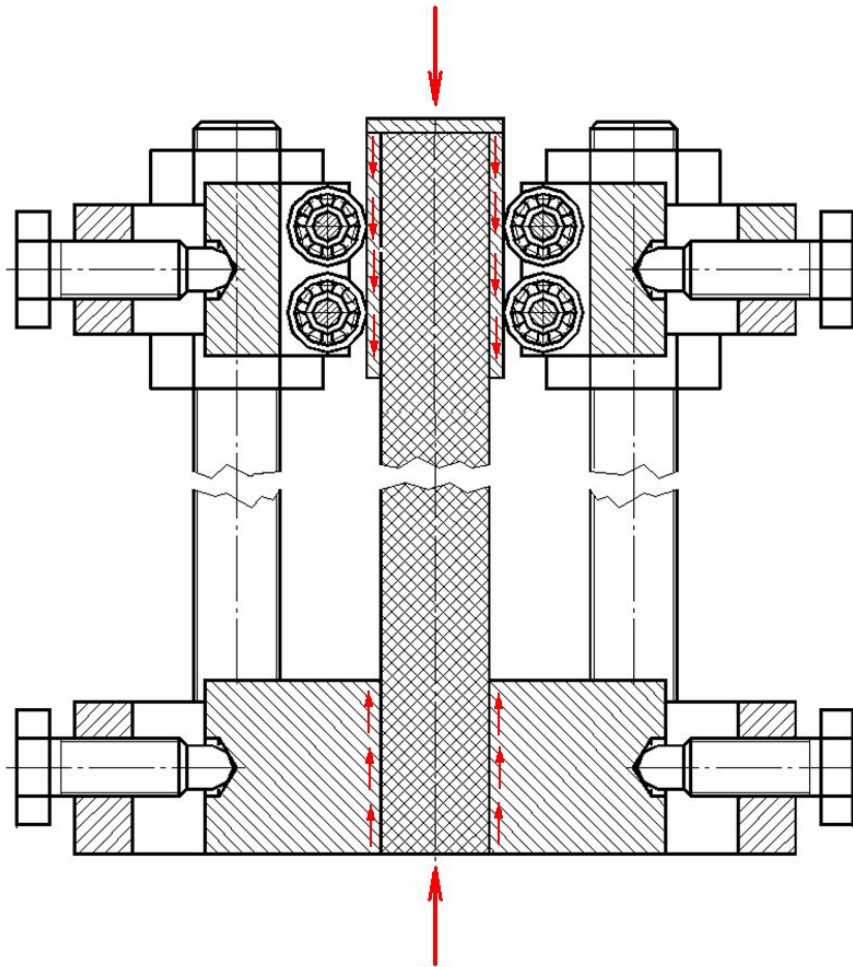
Образец для испытаний на сжатие из однородных и армированных пластмасс (ГОСТ 4651-80)



γ - удельная работа разрушения по Гриффитцу

Образец для испытаний на сжатие (прочность) армированных пластиков (не вдоль волокон) (ГОСТ 25.602-80)

Рекомендуется для стержней из материала относительно небольшой жесткости (например, УУКМ на основе ткани)



Накладки – жесткие, между образцом и накладками – наждачная бумага; в верхней части – шарикоподшипники для обеспечения отсутствия стеснения продольных деформаций

Недостатки приспособления:

- увеличение трудоемкости при подготовке к испытаниям;
- необходимость контроля перекоса образца во время закрепления

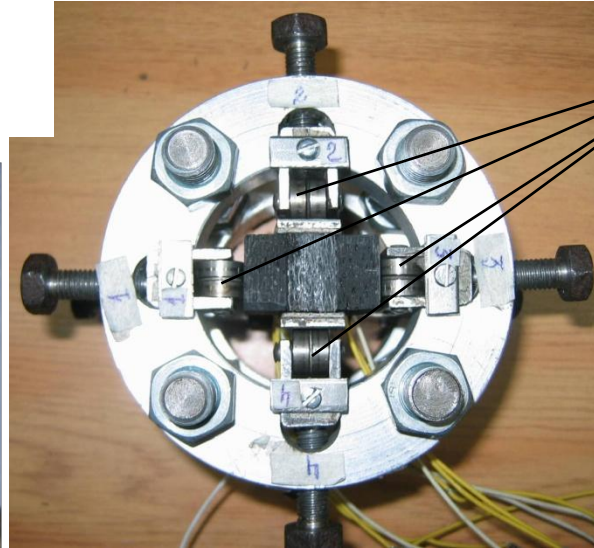
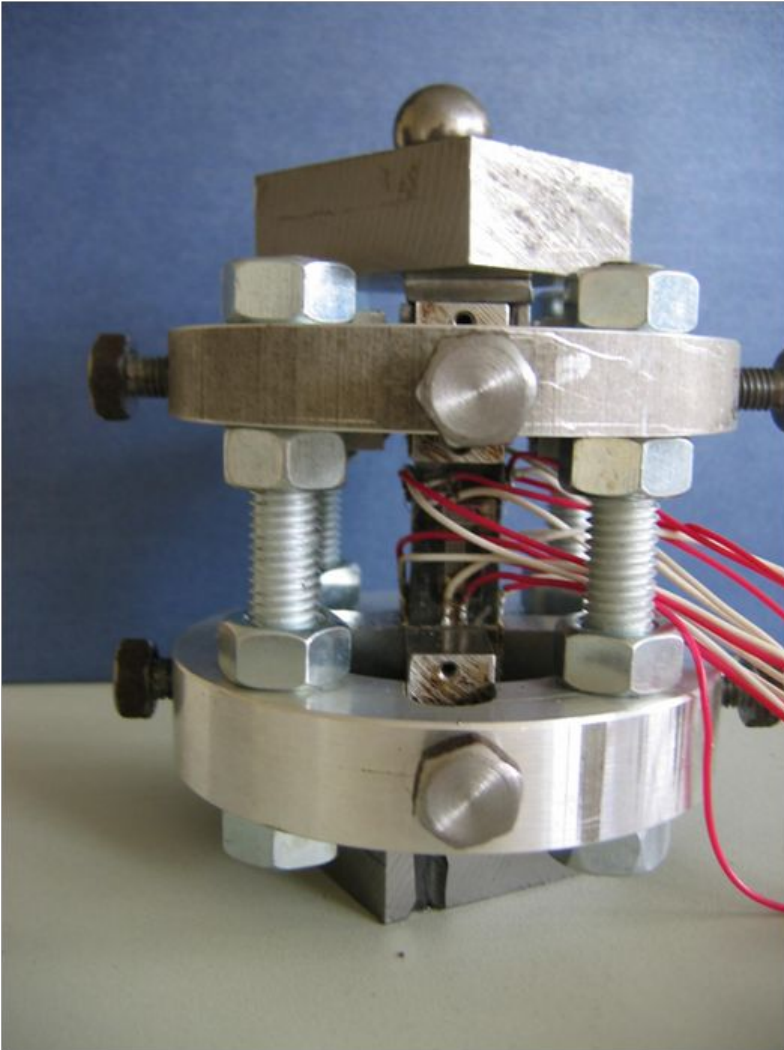
Преимущества приспособления:

- поперечные сжимающие напряжения в зоне торцов уменьшают вероятность разрушения смятием в зоне торца;
- граничные условия, близкие к заделке, увеличивают критическую нагрузку общей потери устойчивости;
- шарикоподшипники обеспечивают отсутствие стеснения продольных деформаций.

Приспособления для нагружения на сжатие образцов – стержней из композитов

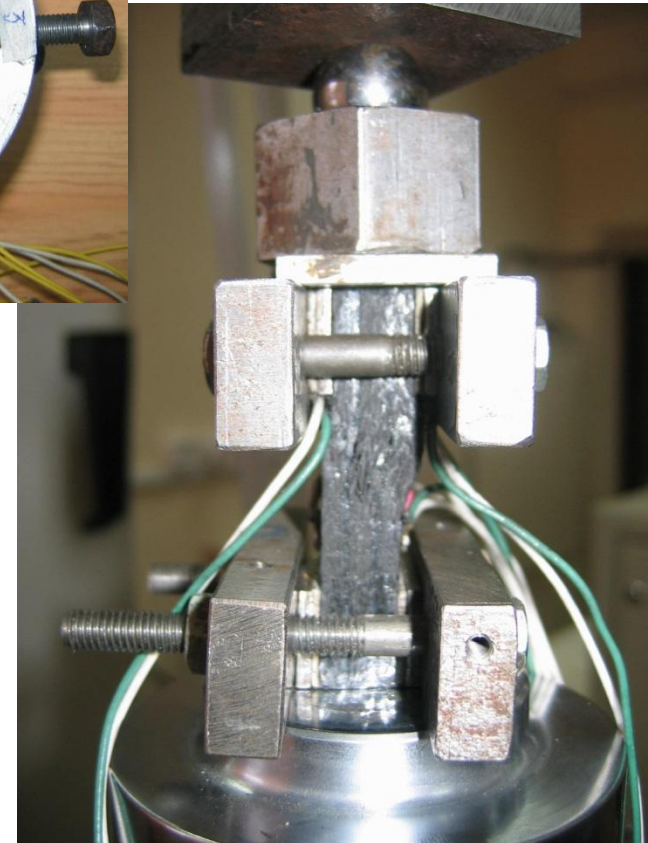
12

Защемление торцов в приспособлении, обеспечивающем параллельность торцов при нагружении



Шарикоподшипники
(вид сверху)

Чем выше
однородность поля
деформаций в рабочем
сечении, тем точнее
определяется
прочность материала



Защемление торцов
между жестких пластин
- предотвращение смятия торцов

Примеры результатов испытаний на сжатие углерод-углеродного материала (влияние размеров образцов)

В плоскости армирования

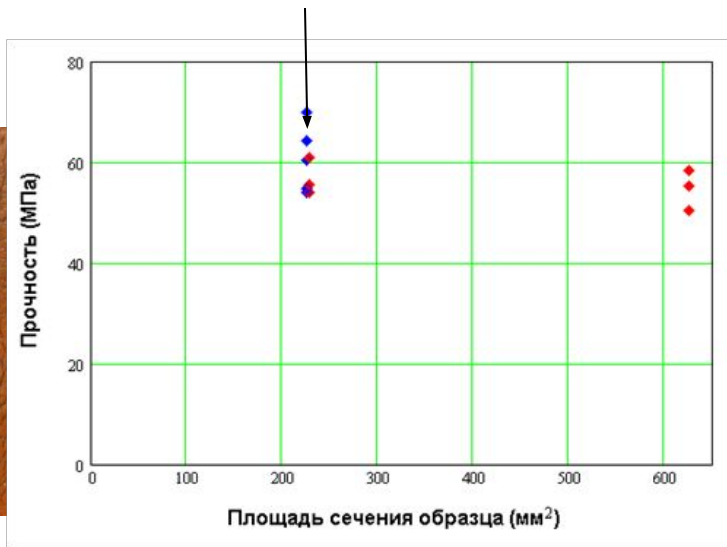
Рабочее сечение 15x15 мм, длина 80 мм



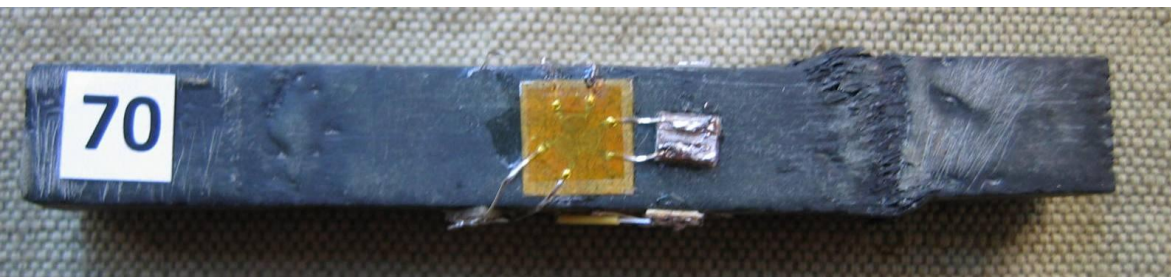
Максимальная разрушающая нагрузка 61 МПа,
максимальные деформации при разрушении 0,60÷0,70 %



Рабочее сечение 25x25 мм, длина 120 мм

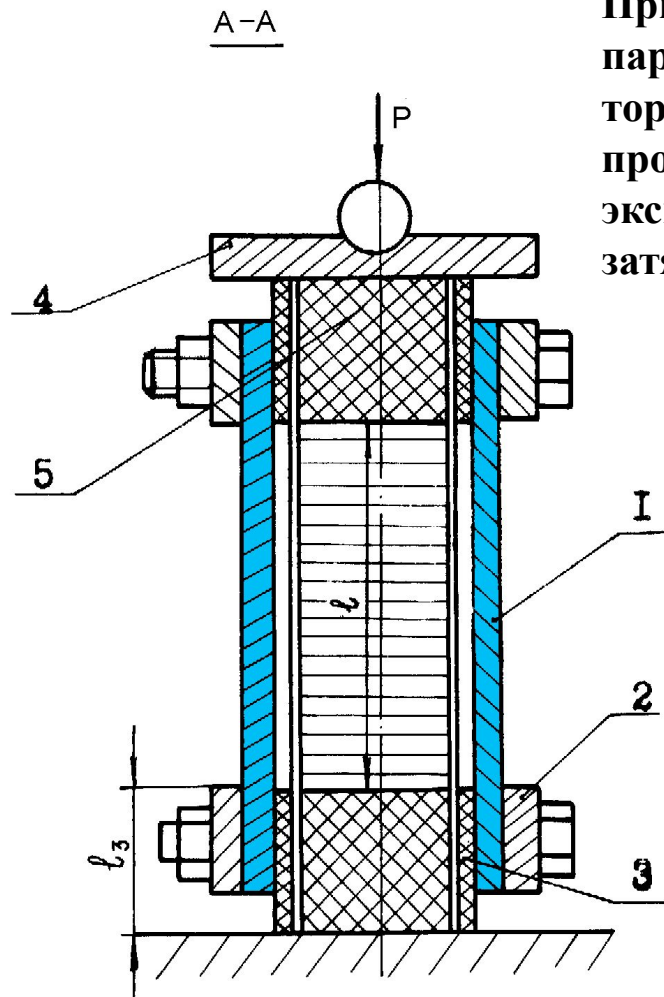
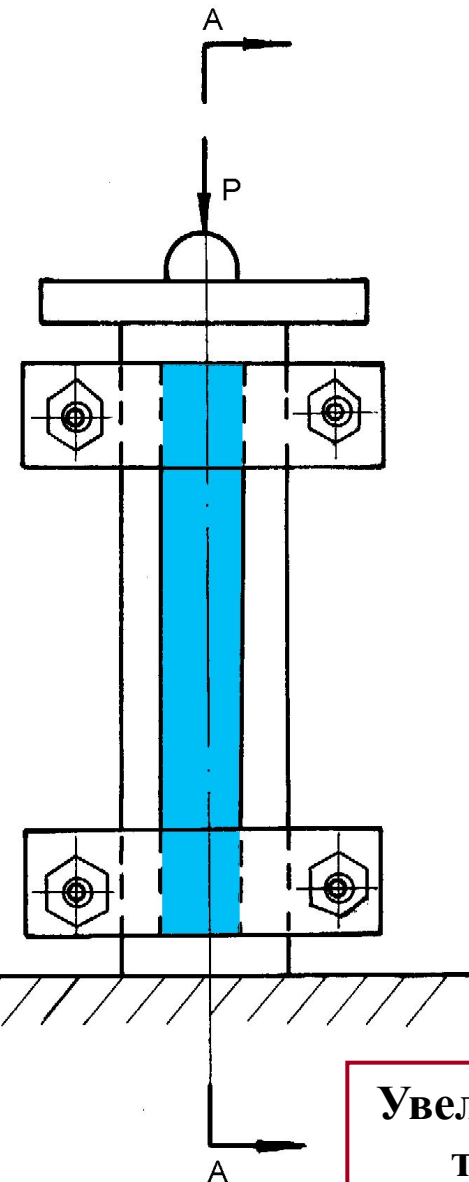


Рабочее сечение 15x15 мм, длина 120 мм



При характерных для композитов разбросах прочности влияние масштабного эффекта на прочность незначительно

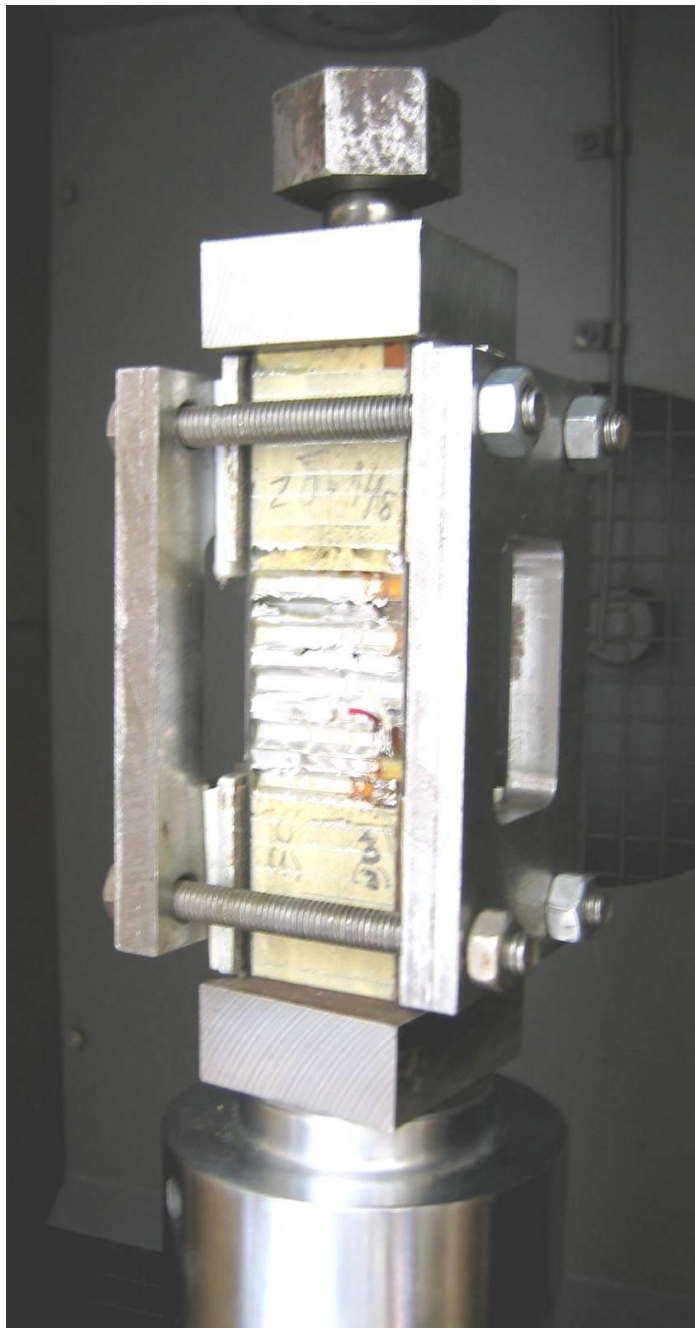
Трехслойные образцы с обшивками из композитов и сотовым наполнителем – способ определения прочности при сжатии тонких плоских образцов (вариант 1 приспособления) 14



Приспособление обеспечивает параллельность взаимного смещения торцов при отсутствии стеснения продольных деформаций (требуется экспериментальный подбор момента затяжки болтов)

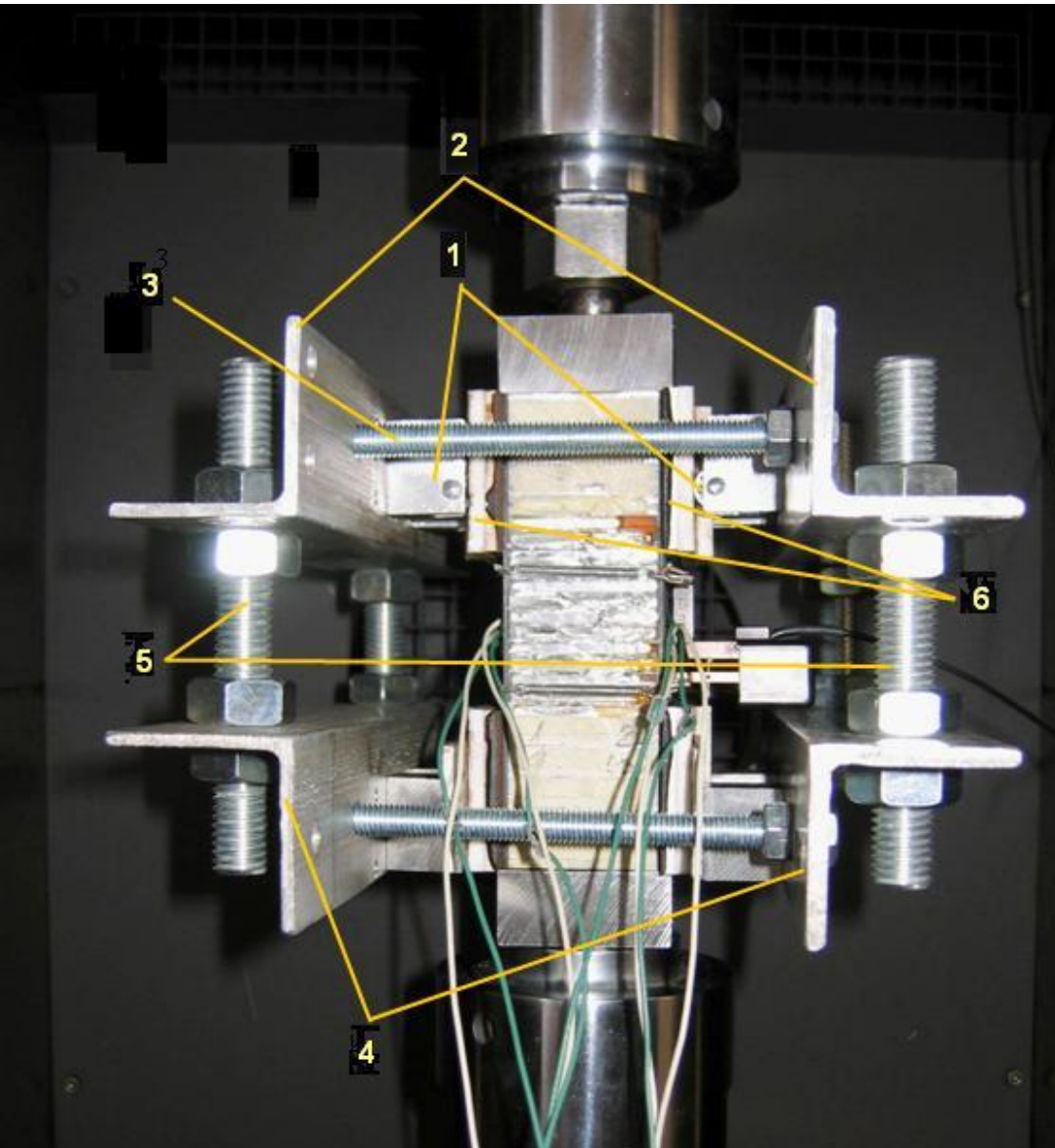
- 1 – поддерживающие планки,
- 2 – стягивающие планки,
- 3 – накладки из металла с фторопластом между накладками и планками 1 и наждачной бумагой между накладками и образцом
- 4 – центрирующая платформа с шариком,
- 5 – внутреннее подкрепление концов (например, эпоксидная смола или сферопластик)

Увеличение достоверности результатов требует дополнительных затрат времени и средств

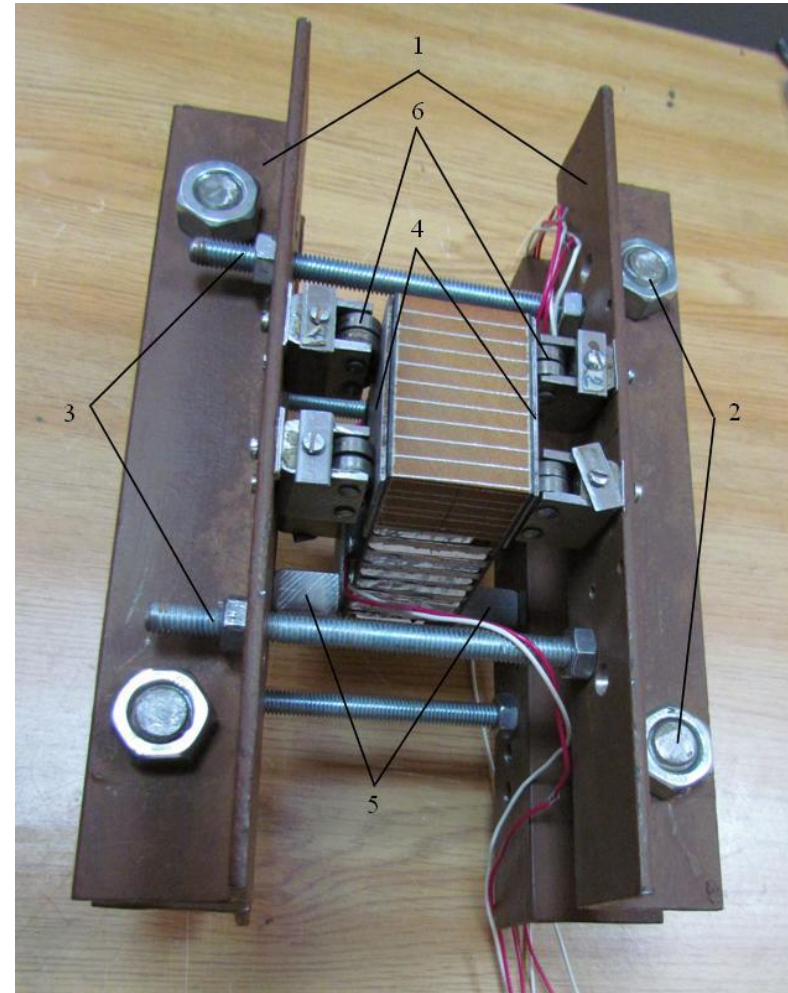


Образцы с углепластиковыми обшивками и сотовым наполнителем из фольги после испытаний до разрушения

Приспособление для нагружения на сжатие трехслойных образцов (вариант 2 приспособления)



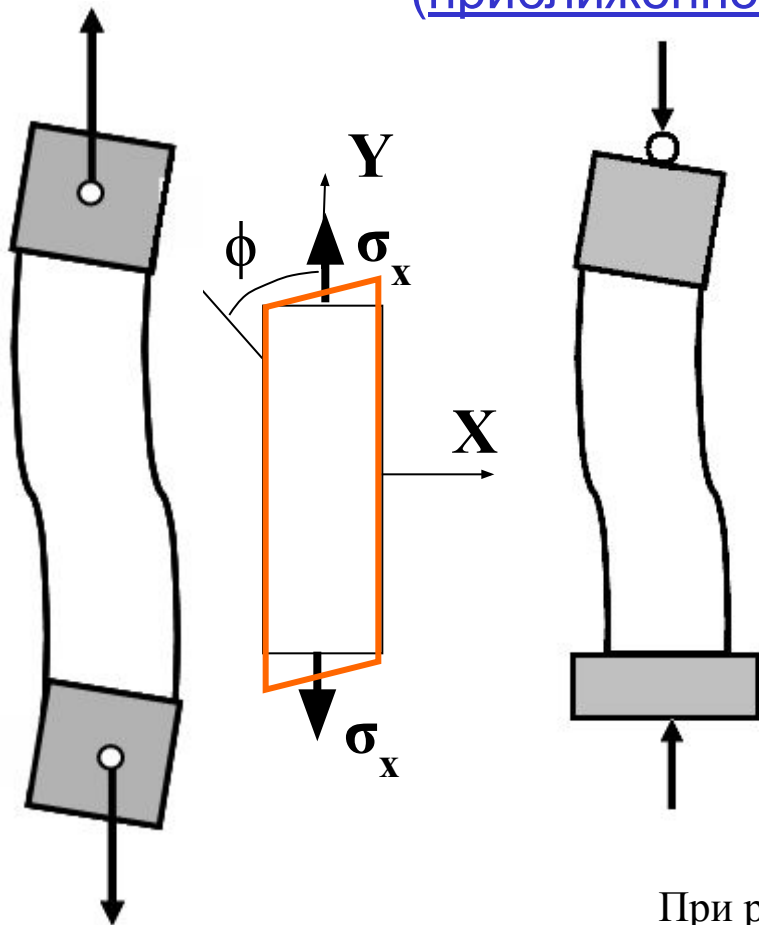
1 – шарнирные блоки; 2, 4 – верхние и нижние уголки;
3, 5 – горизонтальные и вертикальные болты; 6 - накладки



1 – уголки; 2 – вертикальные болты;
3 – горизонтальные болты; 4 – накладки;
5 – нижние опорные блоки
(нешарнирные);
6 – верхние шарнирные блоки

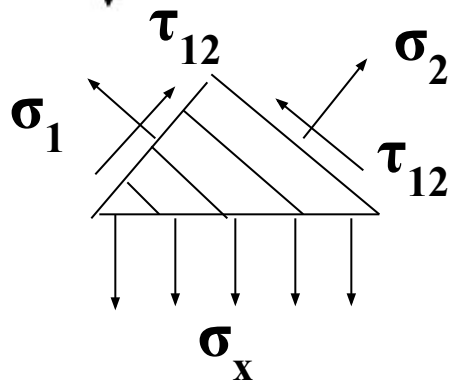
Однонаправленные образцы, вырезанные под углом к осям ортотропии (приближенное определение прочности)

17



При низкой жесткости и прочности при сдвиге (УУКМ) роль стеснения деформаций на концах уменьшается

При растяжении – предпочтительно нагружение через накладки (при обеспечении необходимого качества клеевых слоев)



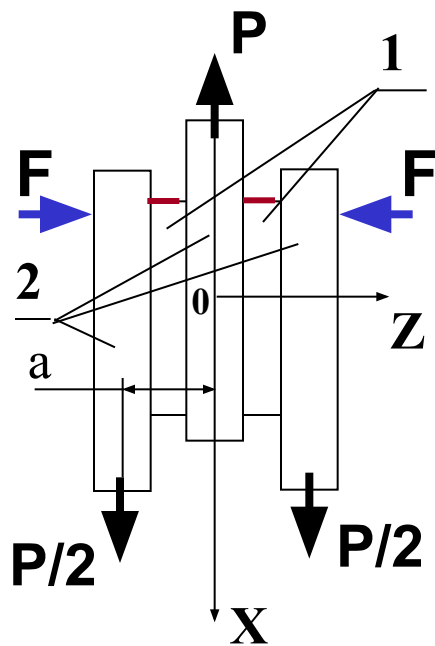
$$\sigma_1 = (\cos^2 \phi) \sigma_x$$

$$\sigma_2 = (\sin^2 \phi) \sigma_x$$

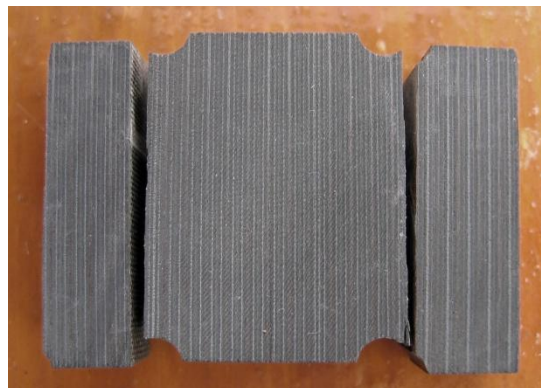
$$\tau_{12} = (\cos \phi \sin \phi) \sigma_x$$

Желательно обеспечить контроль однородности поля деформаций в рабочей зоне (при измерении деформаций в 4-х направлениях при однородном поле деформаций $\epsilon_4 = f(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ – способ проверки однородности поля деформаций)

Образец для определения прочности при межслойном сдвиге
 композитных материалов (вариант б)
 - аналог метода ASTM D 4255

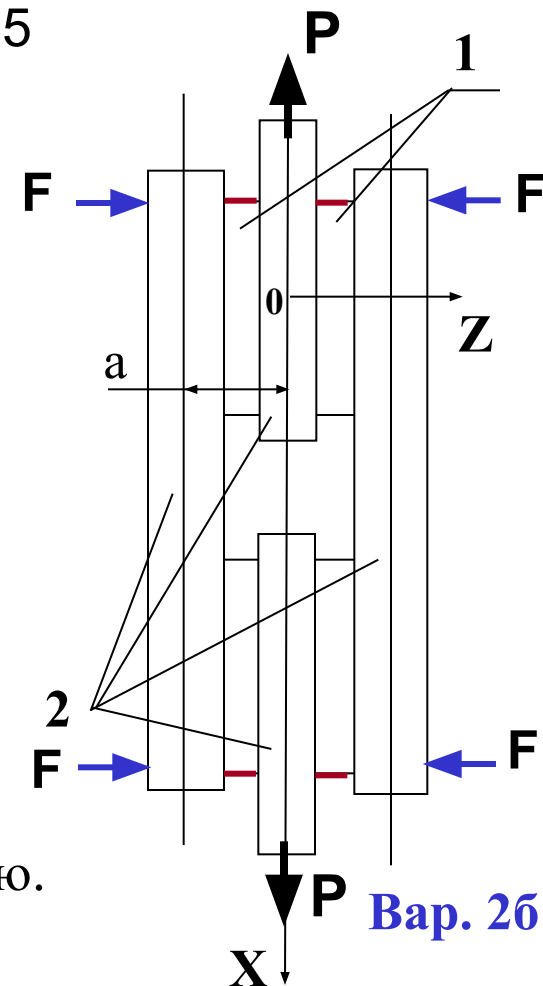


Вар. 16



$[\tau]=58 \text{ МПа}$

1 – образец из углепластика,
 2 – нагружающие скобы,
 F – сила от жесткой скобы,
 препятствующей растяжению.

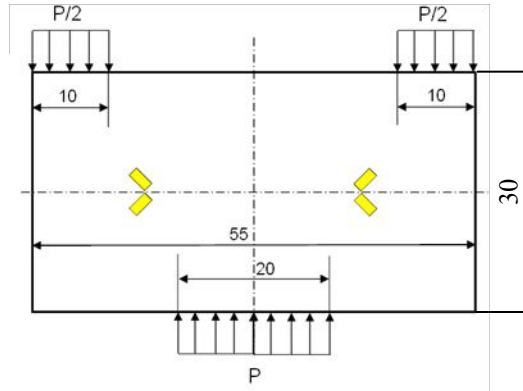
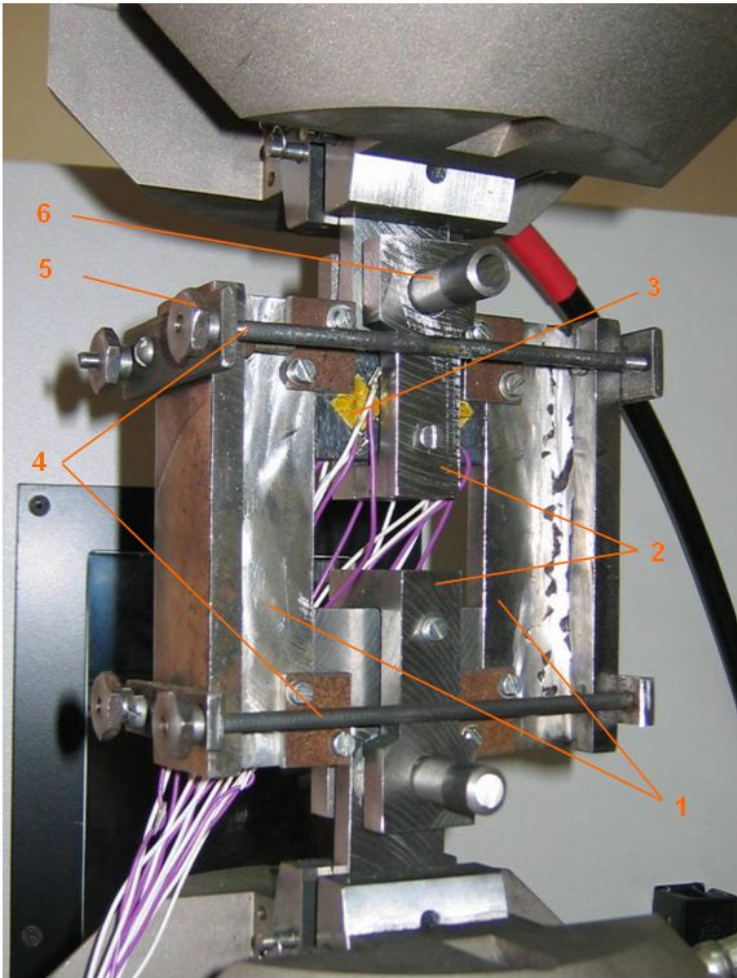


Вар. 26

Недостатки:

- неравномерность касательных напряжений в расчетных сечениях;
- наличие растягивающих нормальных напряжений в выделенных красным цветом сечениях из-за изгибающего момента (частично компенсируется за счет сил F и жесткости боковых скоб).

Пример определения прочности при межслойном сдвиге УУКМ на основе ткани при растяжении между жесткими направляющими

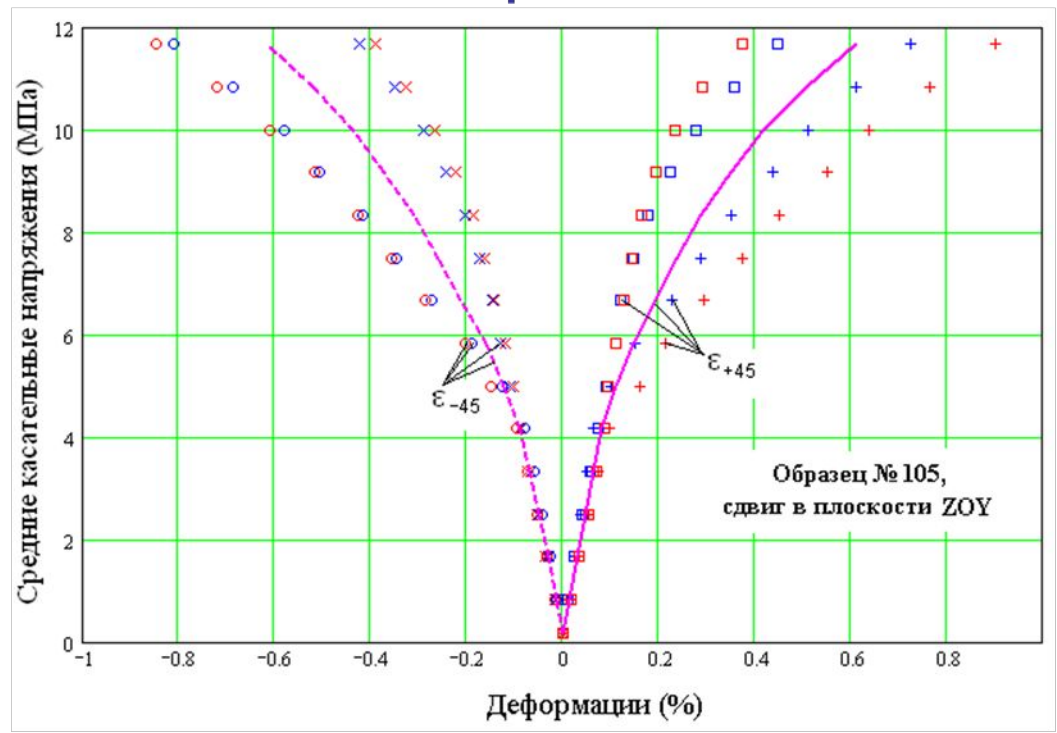


Сдвиг
 $G_{xz} = 3,92 \text{ ГПа}$
 $G_{yz} = 2,69 \text{ ГПа}$

Растяж под 45°
 $G_{xz} = 3,3 \text{ ГПа}$

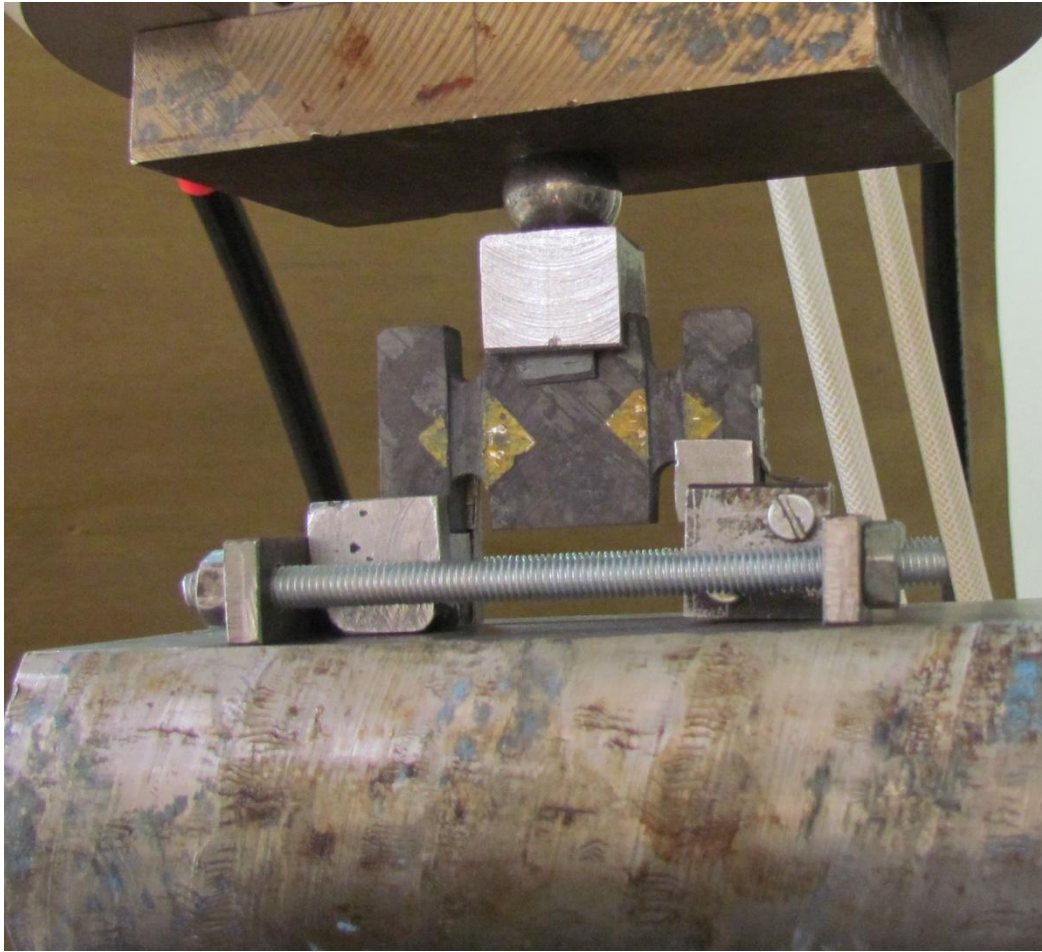
Сдвиг
 $F_{xz} = 22,6 \text{ МПа}$
 $F_{yz} = 17,0 \text{ МПа}$

Растяж под 45°
 $F_{xz} = 18,3 \text{ МПа}$



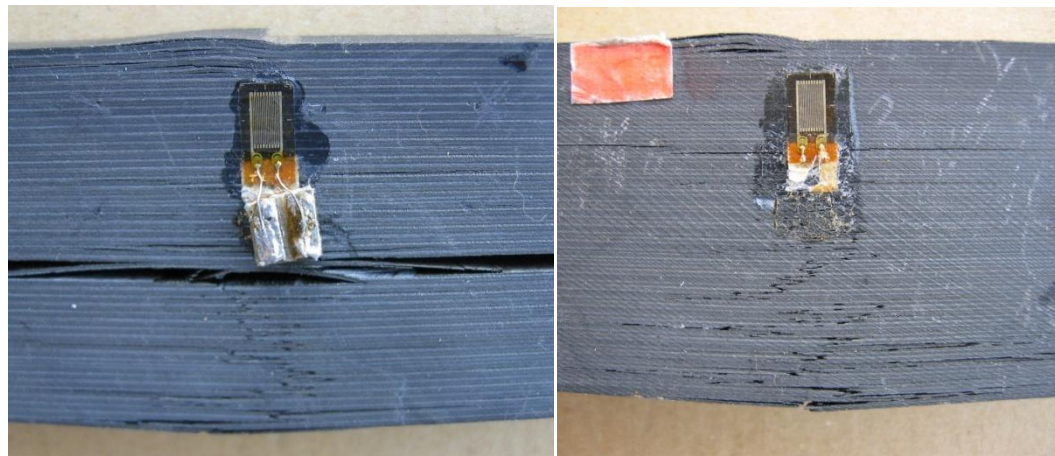
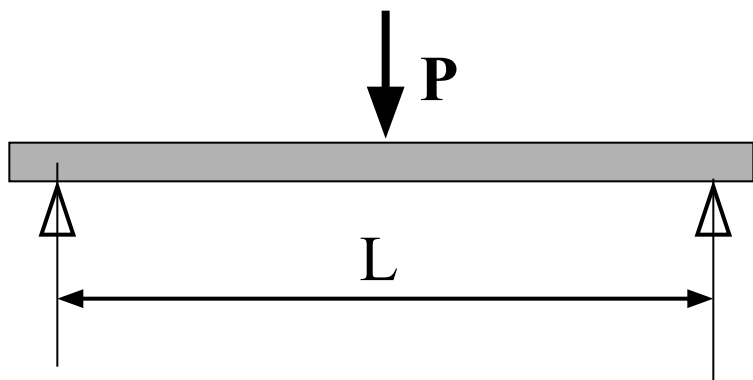
- 1 – боковые нагружающие элементы,
- 2 – центральные нагружающие элементы,
- 3 – исследуемый образец,
- 4 – фиксирующие стержни,
- 5 – гайки фиксирующих стержней, 6 - штифты

Пример определение прочности при сдвиге квазиизотропного углепластика
в плоскости армирования
при сжатии



$$\bar{\tau}_{xy} = 220 \text{ МПа}$$

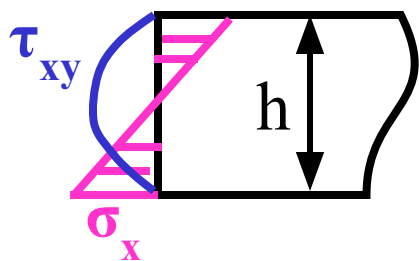
Поперечный изгиб (определение модуля сдвига поперек слоев и прочности межслойного сдвига)



Углепластик (320 слоев, $h = 40$ мм): $[\tau] \approx 30$ МПа

Основные недостатки метода при определении прочности:

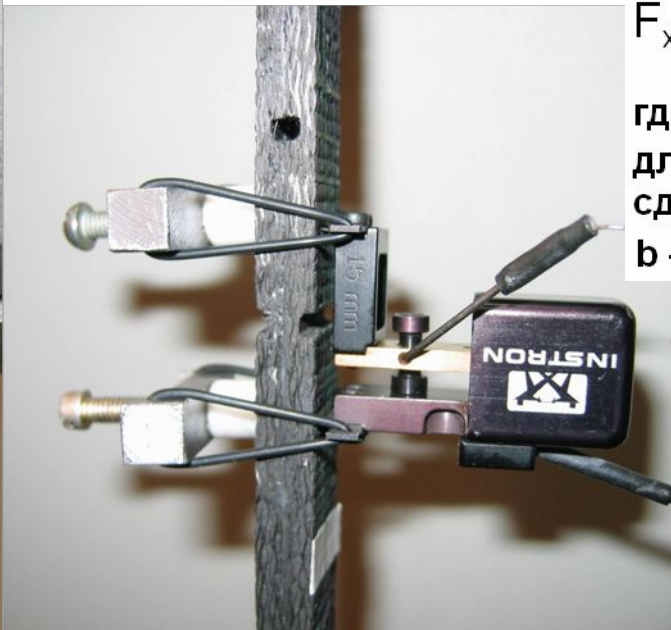
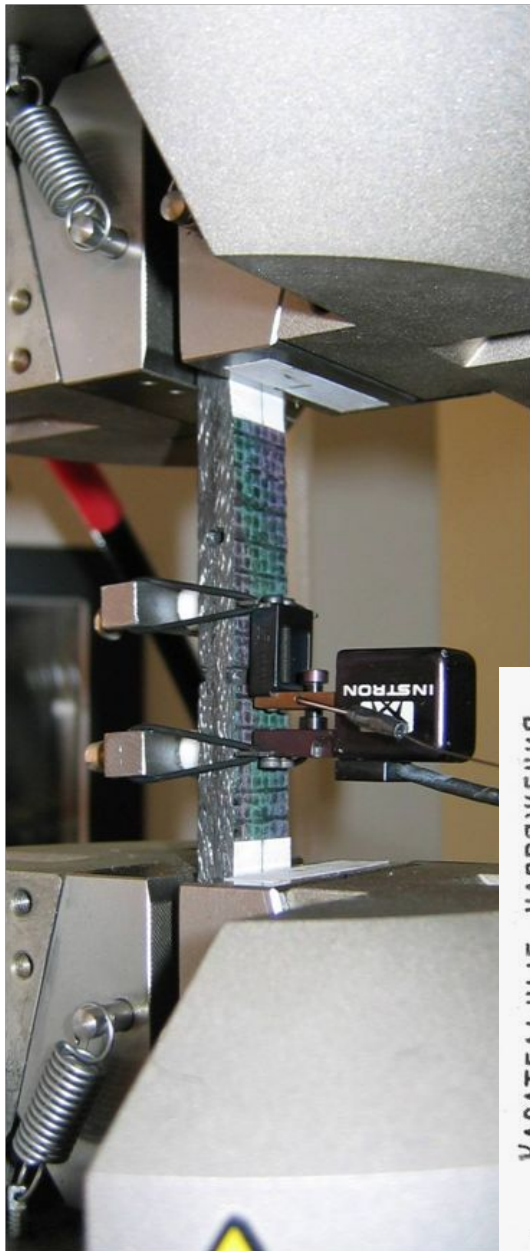
- влияние сжимающих напряжений, особенно – в зоне центральной опоры;
- возможность местной потери устойчивости в зоне сжатия;
- погрешности перехода от слоистой среды к квазиоднородному материалу (волокна в слоях уложены под разными углами).



$$\tau_{\max} = \frac{3P}{2bh}$$

(при испытаниях на сдвиг между жесткими направляющими $[\tau]=58$ МПа – слайд 18)

Пример испытаний на межслойный сдвиг (УУКМ и УККМ) (тонкие образцы)

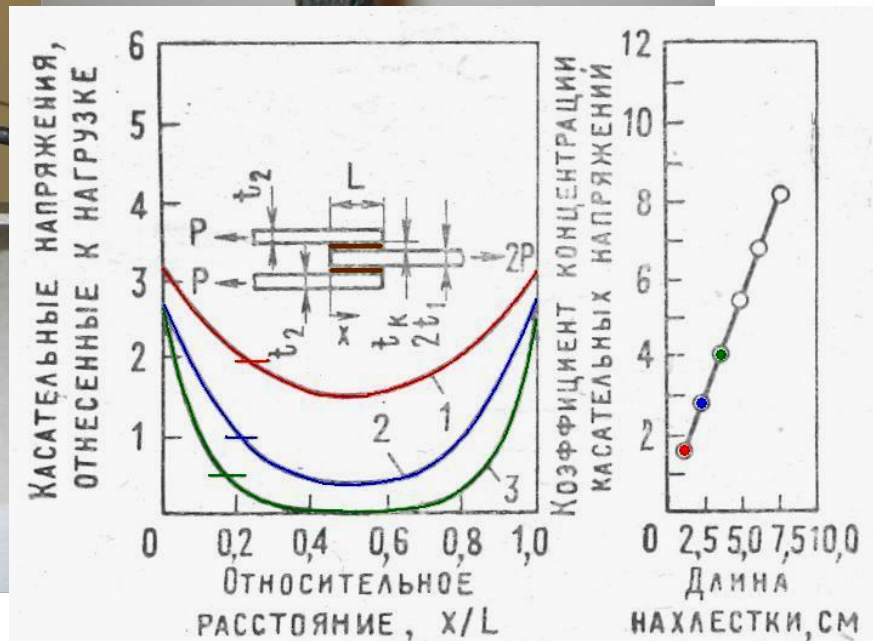
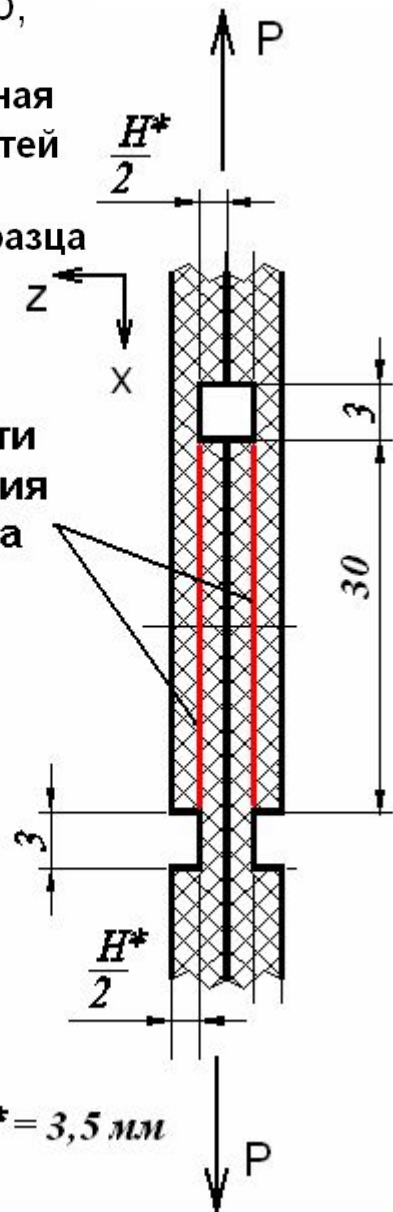


$$\bar{F}_{xz} = P_{max} / ab,$$

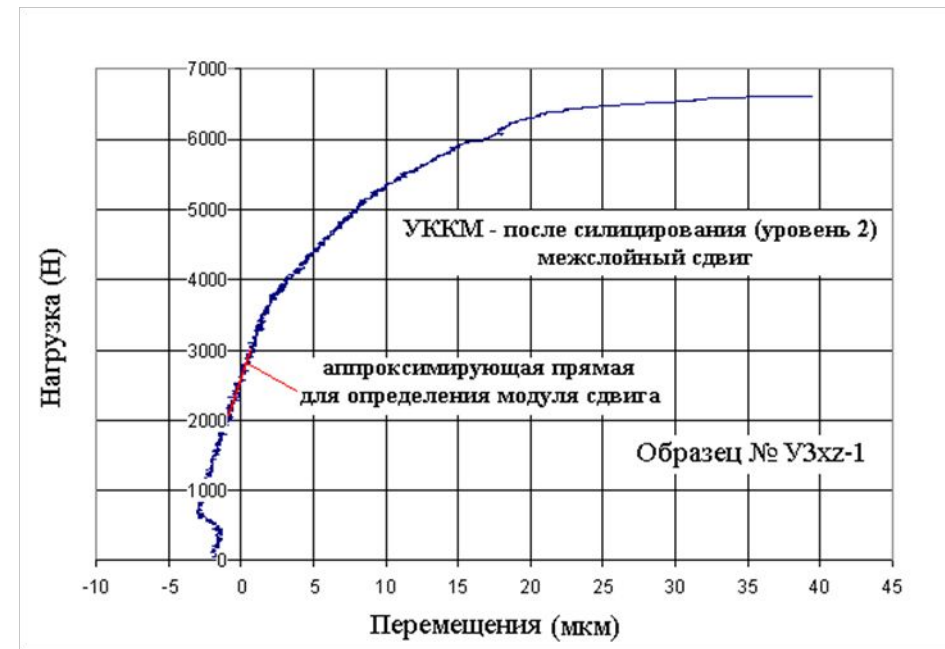
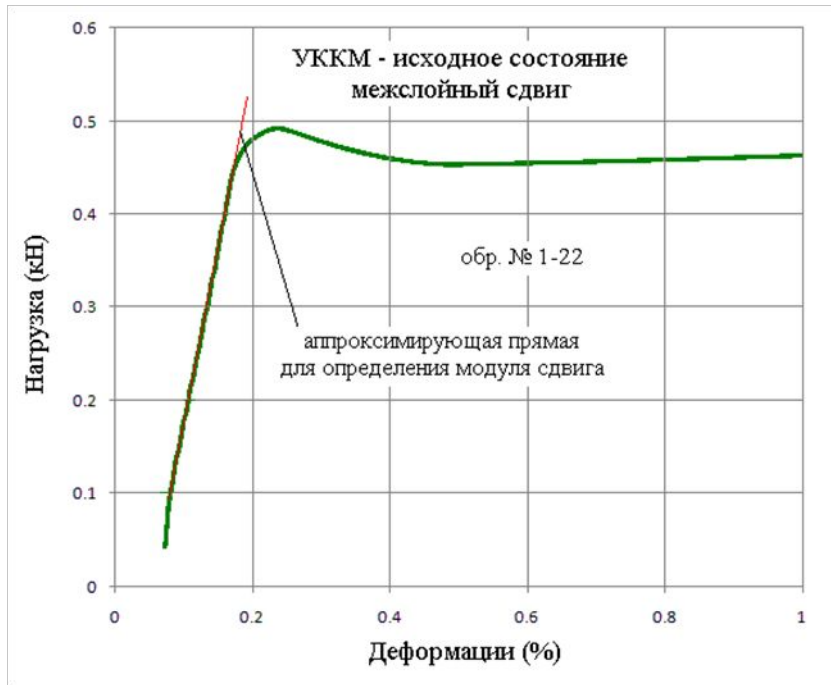
где a – суммарная длина плоскостей сдвига,

b – ширина образца

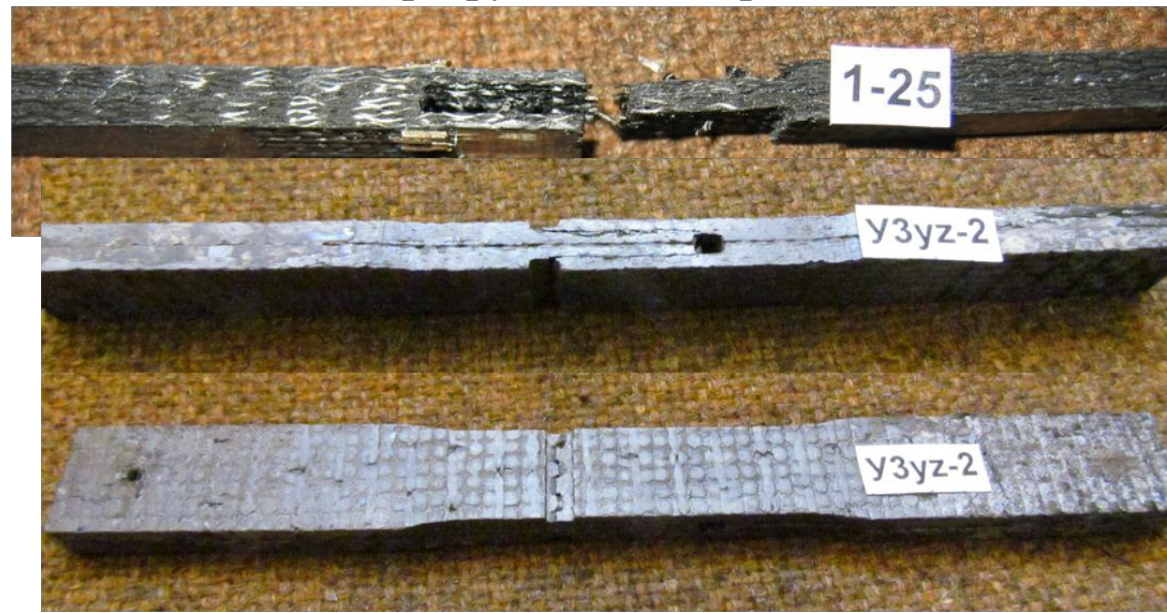
Плоскости разрушения от сдвига



$H^* = 3,5 \text{ мм}$



Вид разрушенных образцов



$$G^*_{xz} = \Delta P / (ba\Delta\gamma),$$

$$\Delta\gamma = \Delta L_c / h$$

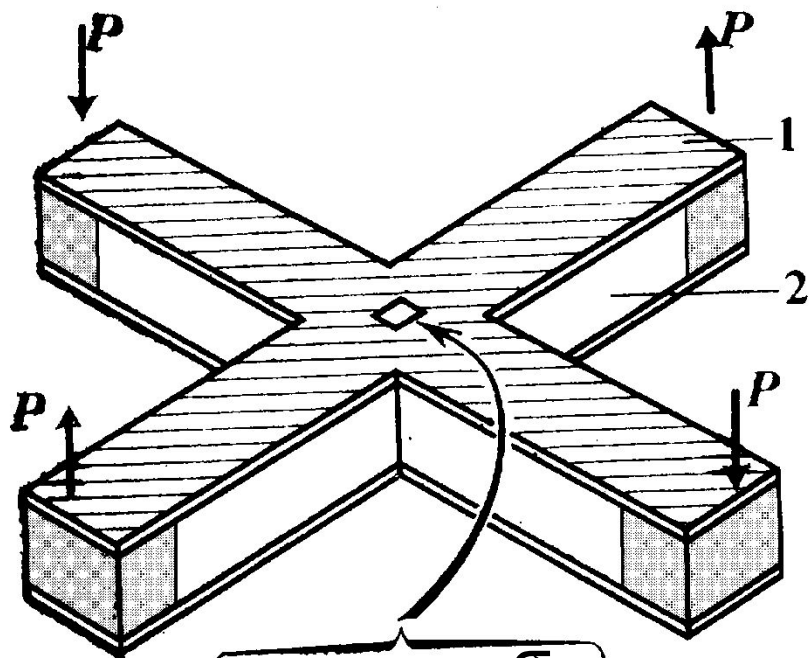
h – толщина слоя ткани (около 0,6 мм),

a – суммарная длина плоскостей сдвига,

b – ширина образца,

ΔL_c – взаимное смещение призм деформометра из-за сдвига частей образца

Образец для испытаний на двухосное растяжение – сжатие или чистый сдвиг обшивок трехслойных материалов (прочность при сдвиге определяется только, если не произойдет разрушения при растяжении поперек волокон в стержневых частях)



1 – исследуемый композитный материал;
2 – «легкий» наполнитель (соты, пенопласт)

$$\sigma_x = -\sigma_y = q$$

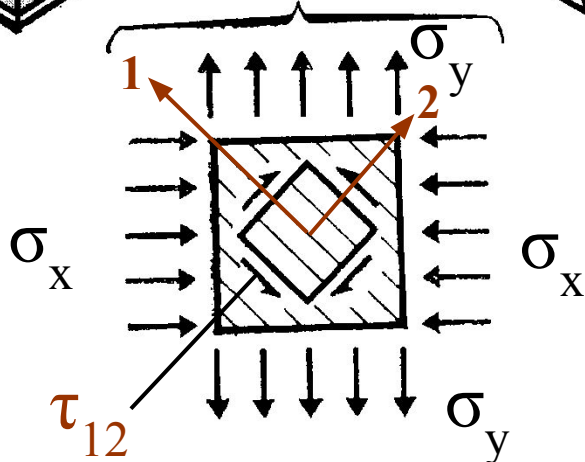
$$\sigma_1 = \sigma_x \sin^2 45 + \sigma_y \cos^2 45 = (q - q) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2$$

$$\tau_{12} = (\sigma_x - \sigma_y) \sin 45 \cdot \cos 45 = (q + q) \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 = q$$

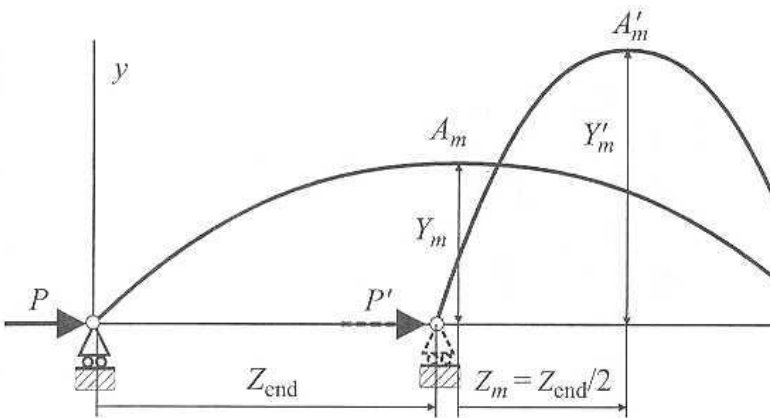
Недостатки при определении

прочности при сдвиге:

- концентрация напряжений в углах (зависит от радиуса скруглений);
- конечная (неопределенная) жесткость на сдвиг подкреплений на концах;
- сложный образец и способ нагружения (большой расход материала).



Продольный изгиб как метод экспериментального определения прочности и модуля упругости высокопрочных материалов («МКМ», 2004 г., №1, стр.25-42)

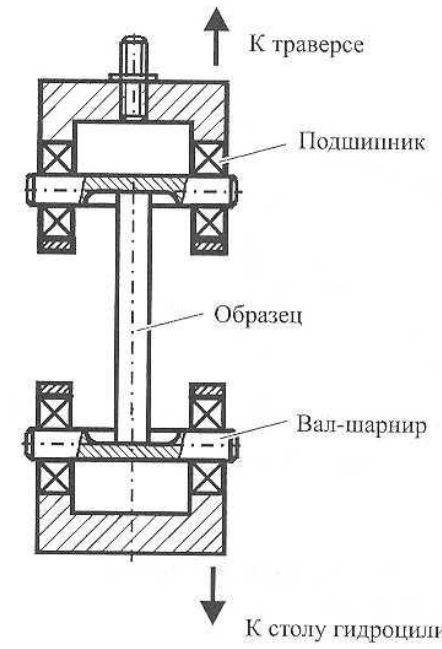


$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{L^2} \quad M_{max} = -PY_{max}$$

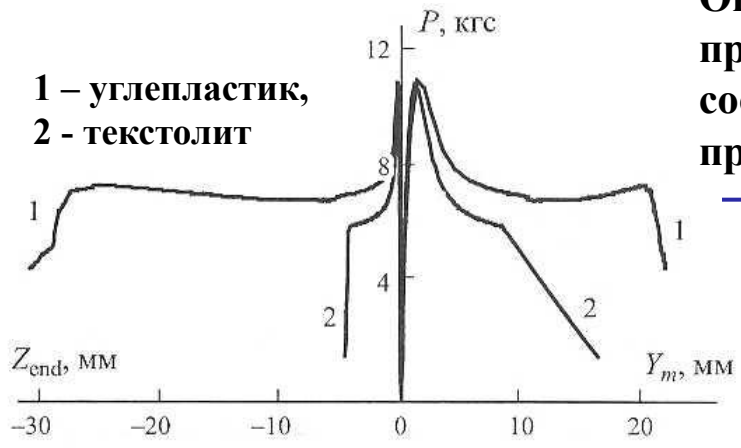
$$\sigma_{max}^{изг} = \frac{M_{max}}{W}, \quad W = \frac{bh^2}{6}$$

$$\sigma_{max}^{\pm} = \sigma_{max}^{изг} \times \frac{P}{bh}$$

b и h – ширина и высота поперечного сечения стержня



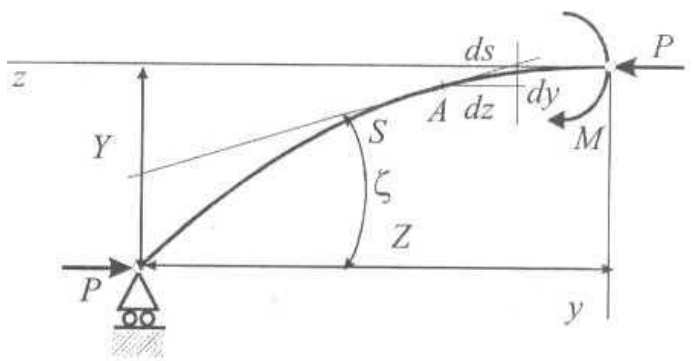
Определяем только тот предел прочности, который соответствует минимальной прочности (растяжения-сжатия)



Из условий равновесия при решении нелинейного уравнения можно найти зависимость между максимальным прогибом Y_{max} и взаимным смещением концов Z_{end} :

$$\frac{d^2 \zeta}{ds^2} = -\frac{P}{EJ} \sin \zeta$$

$$\frac{Y_{max}}{L} = f\left(\frac{Z_{end}}{L}\right)$$



- Основное преимущество:**
- зона разрушения удалена от зон закрепления
- Основной недостаток:**
- неоднородность по толщине напряжений и деформаций в опасном сечении

Плоские образцы при испытаниях на растяжение

1. Зачем при испытаниях плоских образцов на растяжение приклеивают наклейки?
2. Какой материал предпочтительно использовать для наклеек?
3. Где находится зона с максимальной концентрацией напряжений у образца с наклейками?
4. При каких схемах армирования нельзя использовать образцы – лопатки без наклеек и почему?
5. Какие три условия надо обеспечить при закреплении образца?
6. Как можно уменьшить вероятность разрушения в захватах, изменяя размеры образца?
7. Почему у образцов-лопаток из композитов длина рабочей части и радиусы скругления больше, чем у металлических образцов?

Плоские и трехслойные образцы при испытаниях на сжатие

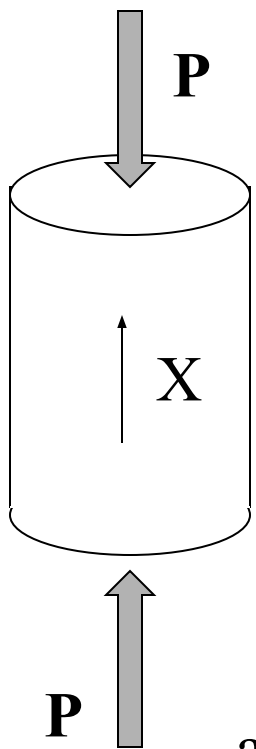
1. Какие основные трудности при испытаниях образцов на сжатие?
2. Как можно предотвратить смятие торцов при сжатии?
3. Зачем нужна центрирующая платформа при испытаниях на сжатие?
4. Как контролируется однородность поля деформаций в рабочем сечении?
5. Для чего нужны направляющие рамки при испытаниях на сжатие и как обеспечить отсутствие стеснений продольных деформаций при использовании этих рамок?
6. В чем основное преимущество трехслойных образцов с обшивками из исследуемого материала при испытаниях на сжатие?

Особенности испытаний на сдвиг

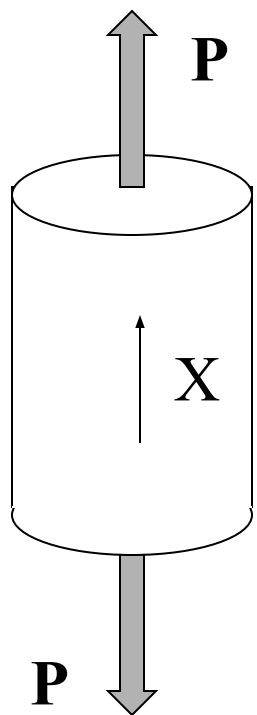
1. Почему при исследовании межслойного сдвига на образцах с вырезами модуль сдвига называют условным?
2. Как измерить модуль сдвига при нагружении призматического образца между жесткими направляющими?
3. Что может привести к преждевременному разрушению при нагружении призматического образца на сдвиг между жесткими направляющими и как предотвратить это?
4. Где точнее определяется прочность на межслойный сдвиг: при нагружении на трехточечный изгиб или на сдвиг между жесткими направляющими?

Продольный изгиб как метод исследования высокопрочных композитов

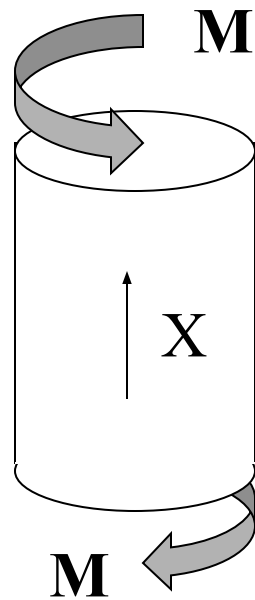
1. Какие характеристики материала можно определить при таком нагружении?
2. Какие величины нужно измерять во время эксперимента?
3. Основной недостаток и основное преимущество метода.
4. Почему на концах стержня должны быть шарниры?



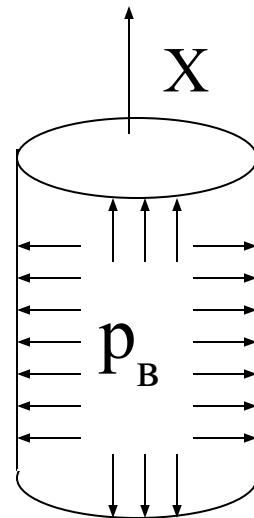
а)



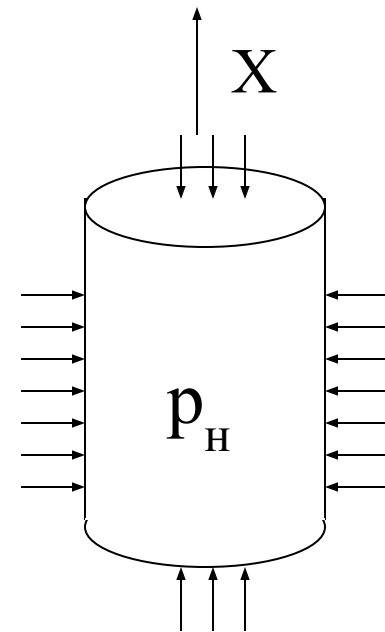
б)



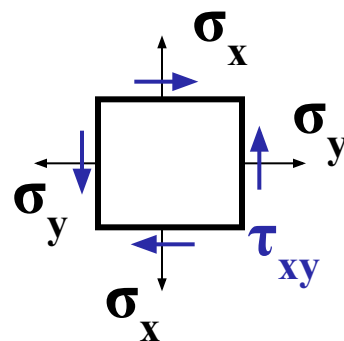
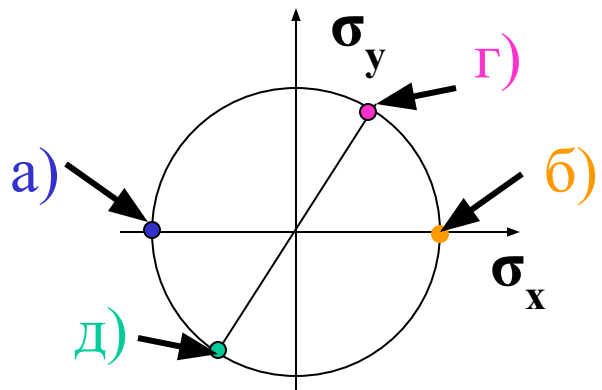
в)



г)



д)



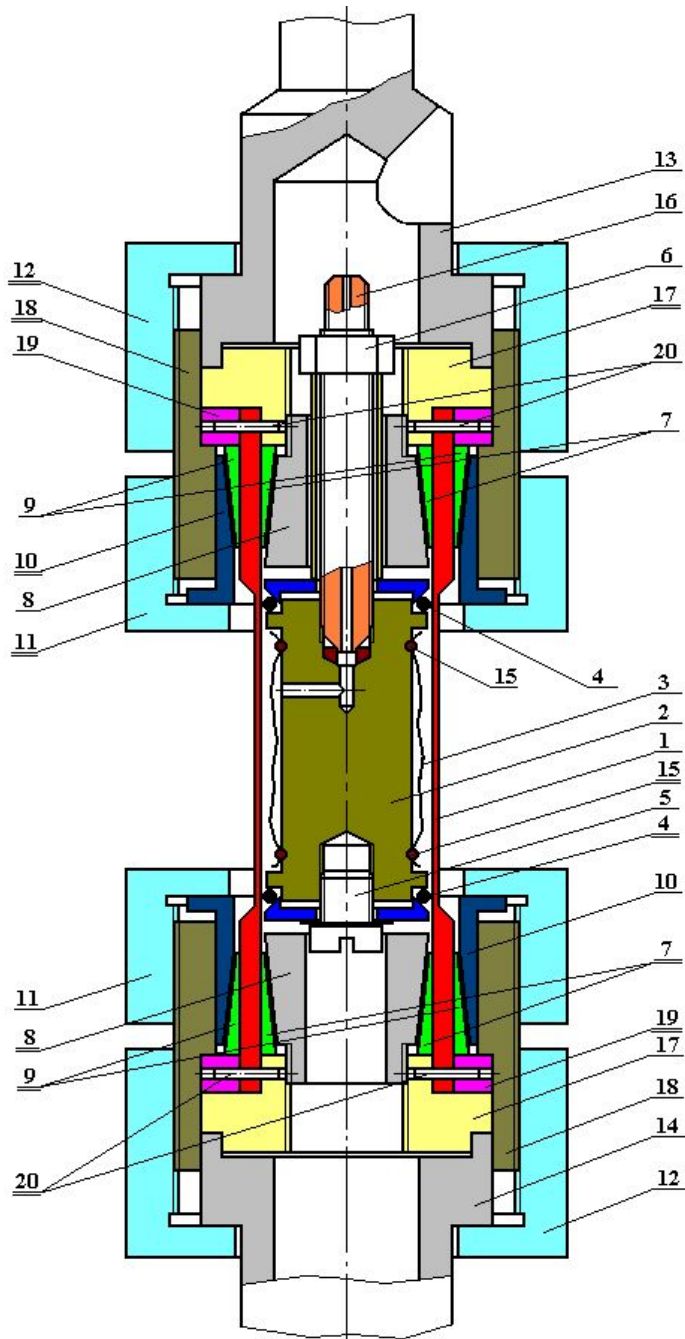
в) $\tau_{xy} \neq 0, \sigma_x, \sigma_y = 0$

г), д) $\sigma_y = 2 \sigma_x$

г) $\sigma_y, \sigma_x > 0,$

д) $\sigma_y, \sigma_x < 0$

(растяжение, внутреннее давление с компенсацией осевой нагрузки, момент)



1- образец;
13, 14 – стержневые тяги испытательной машины;
11, 12 – замки приспособления.

Детали для создания внутреннего давления с компенсацией осевой составляющей:

2 – вкладыш; 3 - резиновый чехол;
4 - резиновые кольца; 5, 6 – винт и гайка для заземления колец 4; 15 – проволока; 16 - штуцер.

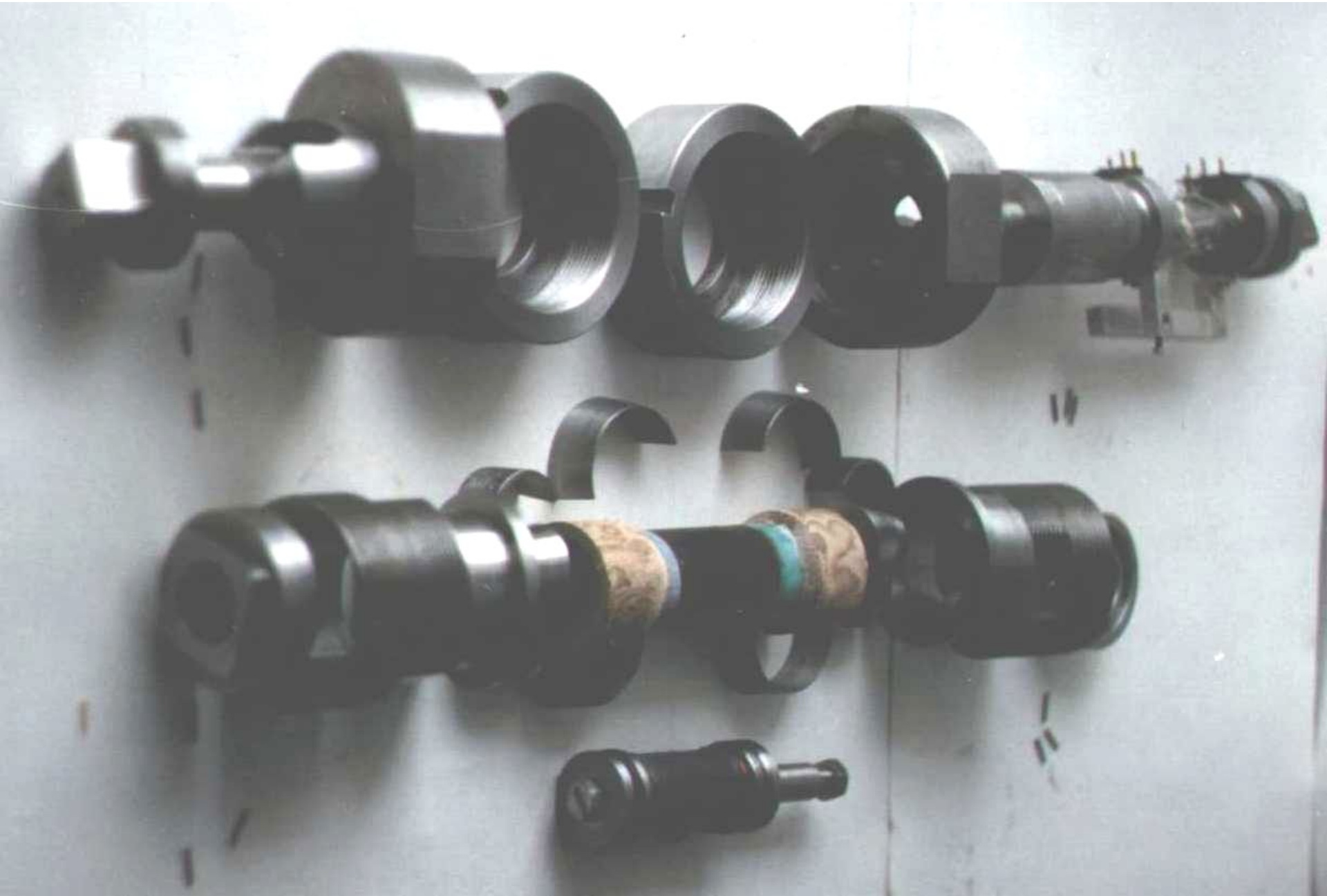
Детали для осевого нагружения:

7 - внутренние конические полукольца;
9 - наружные конические полукольца;
8, 17 - втулки для поджатия внутренних полуколец;
10, 18- гайка и втулка для поджатия наружн. полуколец.

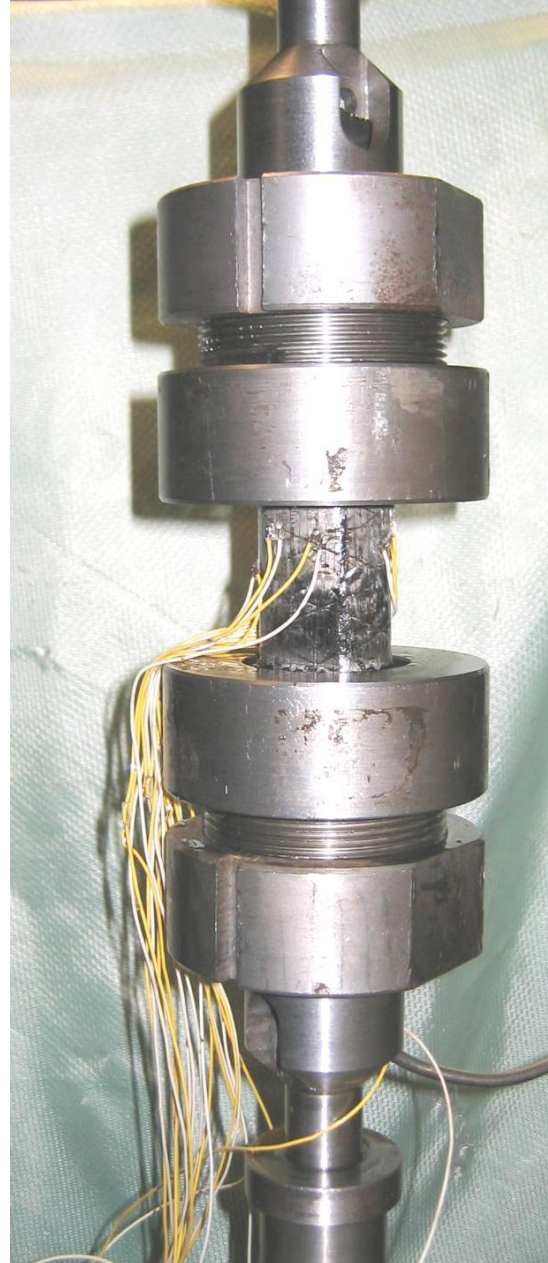
Детали для нагружения крутящим моментом:

20 - штифты для передачи крутящего момента через кольца 19 и жестко прикрепленные к ним втулки 17;
(поворот втулок 17 относит. тяг 13 и 14 исключен)

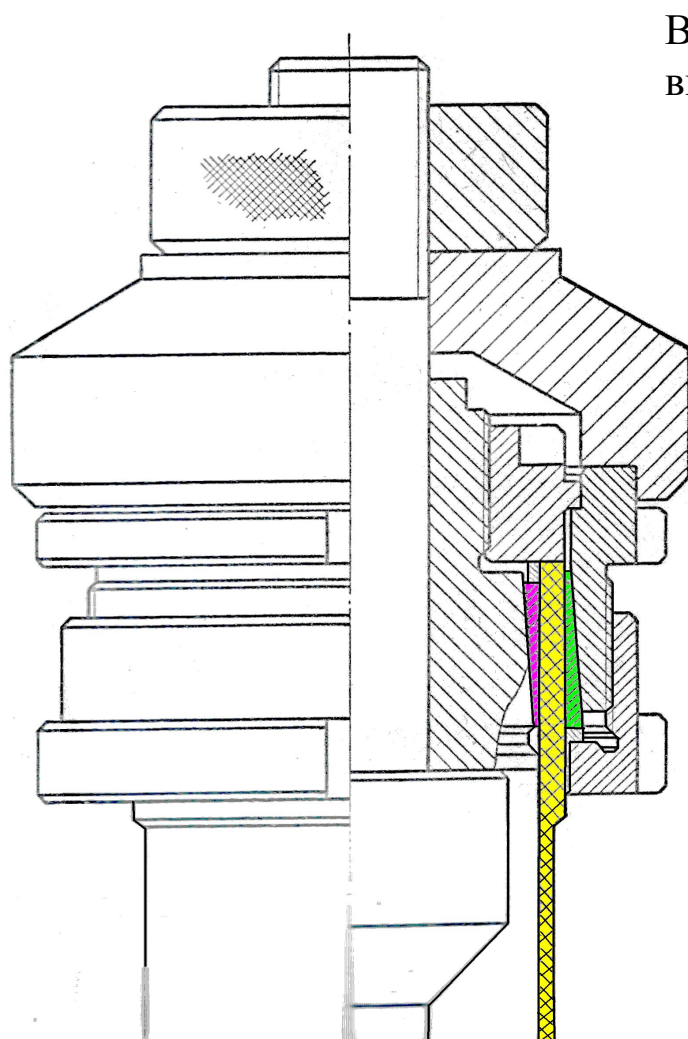
Приспособление для сложного нагружения трубчатого образца



Трубчатые образцы из композитов



Варианты закрепления трубчатых образцов



а) растяжение - сжатие

Внутренний
вкладыш



б) сжатие в специальных платформах
с внутренним вкладышем

Примеры разрушения трубчатых образцов

Намотка



Сжатие, $\pm 30^\circ$ относ. оси - трещины, параллельные волокнам, и обрыв волокон



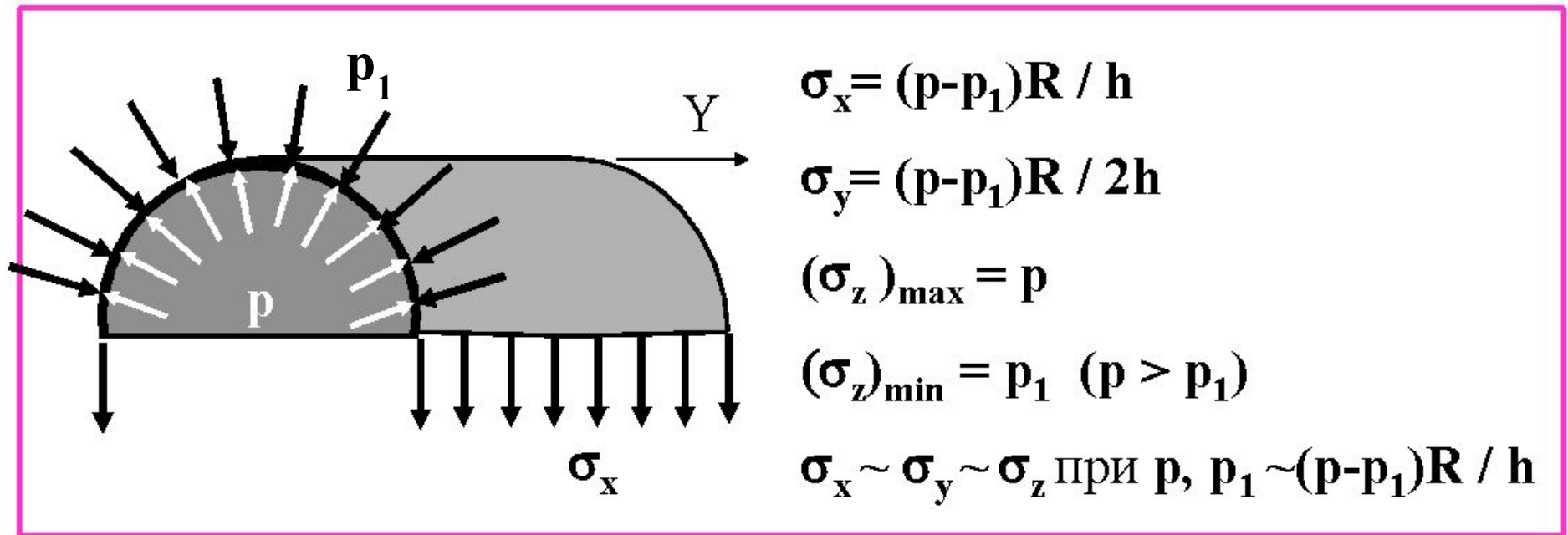
Растяжение, $\pm 30^\circ$ относ. оси - расслоение и обрыв волокон - зона разрушения перпендикулярна оси

Плетение

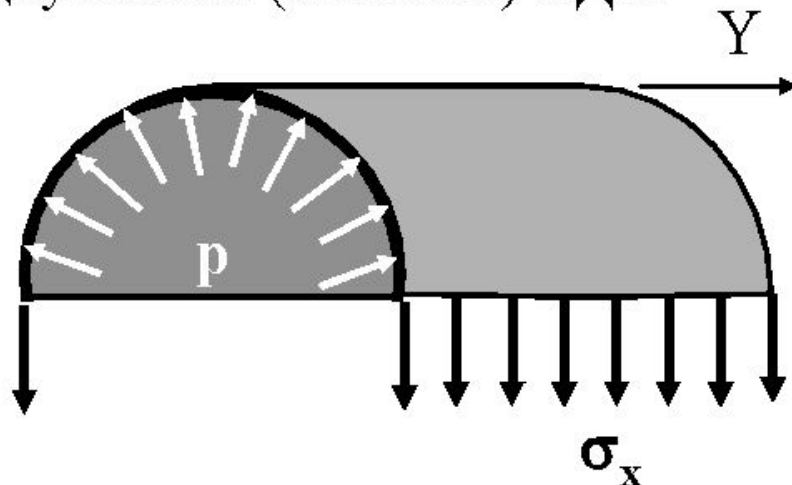


Внутреннее давление с компенсацией осевой нагрузки - растяжение только в окружном направлении, схема армирования $0^\circ / \pm 60^\circ$ относительно оси - трещина, параллельная продольной оси

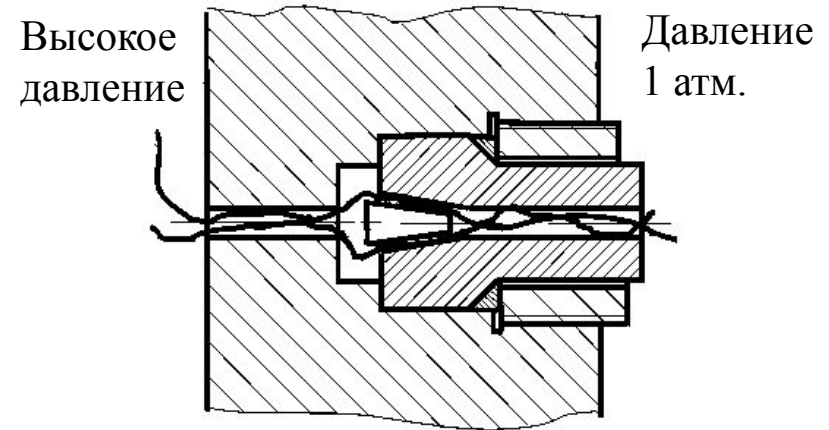
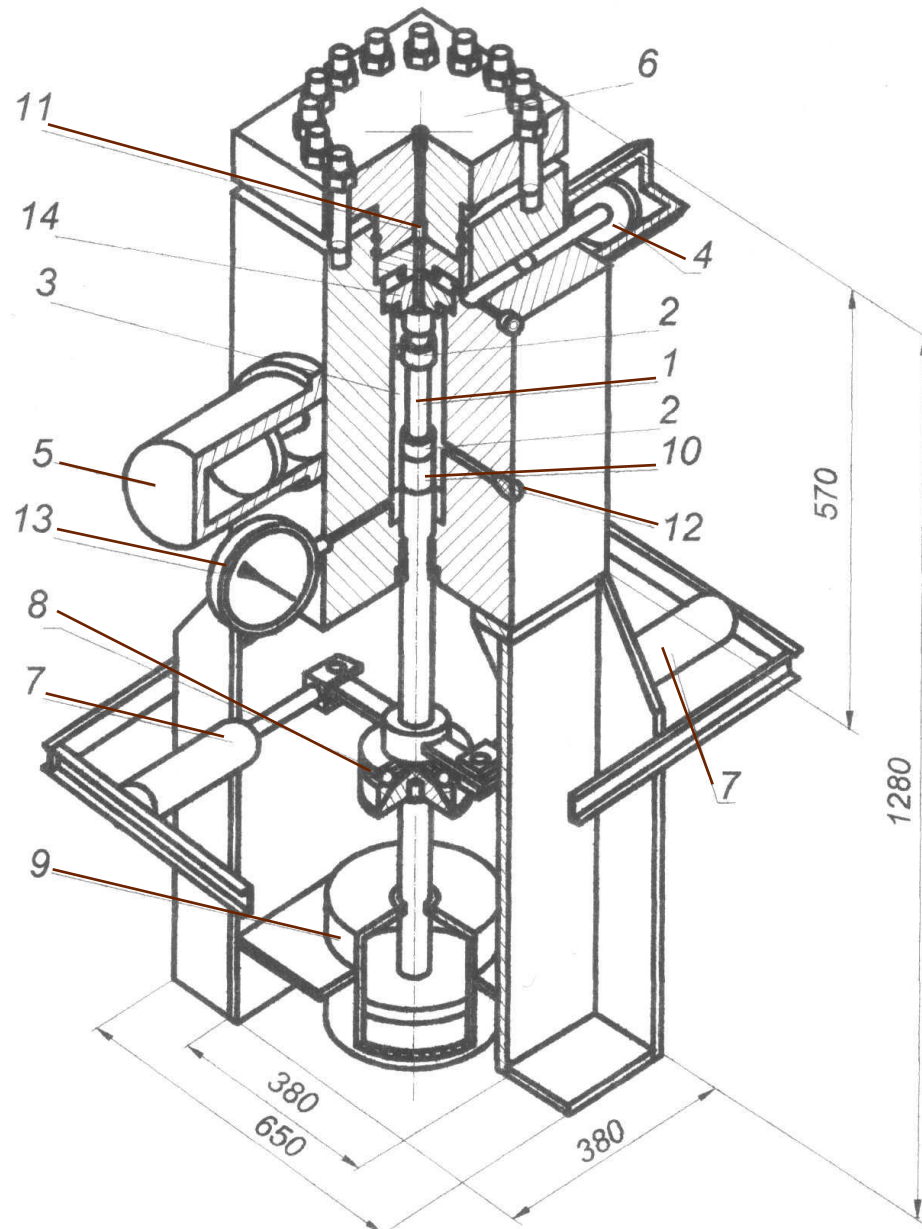
Объемное напряженное состояние
на **ТОНКИХ** трубчатых образцах



При двухосном (плоском) НДС:



Установка для испытаний на трехосное нагружение

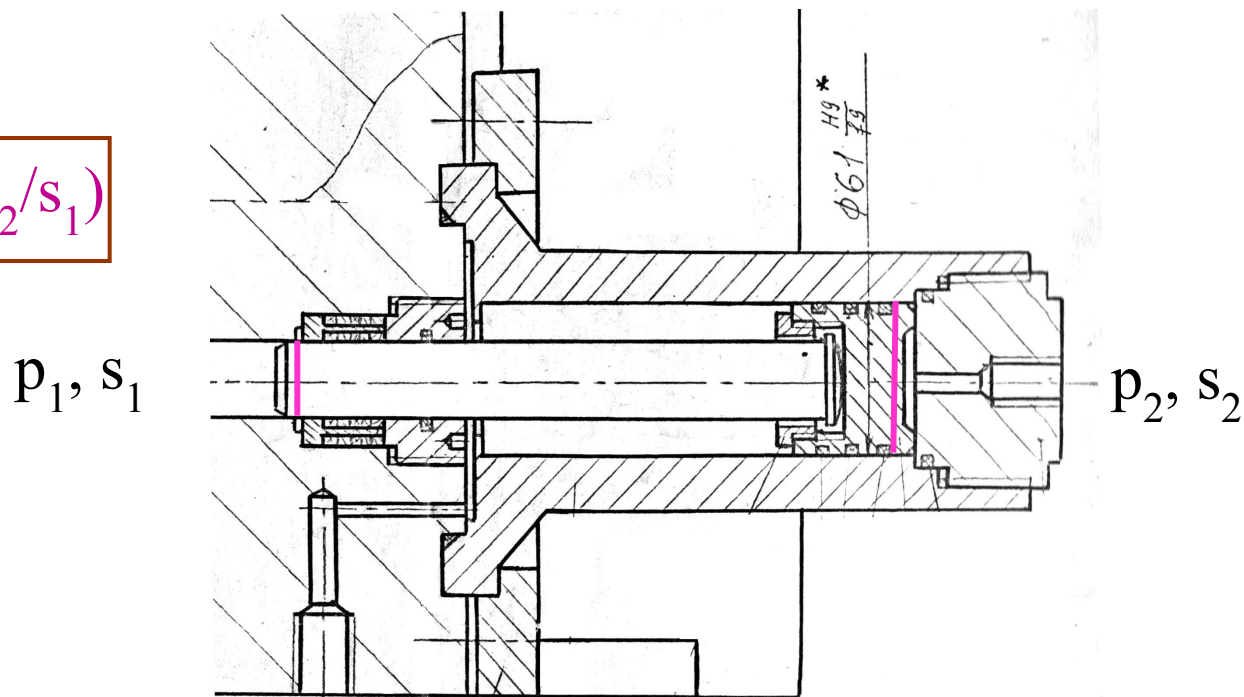


Герметичный разъем для вывода показаний датчиков деформаций

- 1 – образец;
- 4 - мультипликатор (давление внутри образца);
- 5 - мультипликатор (давление снаружи образца);
- 7 – гидроцилиндры крутящего момента,
- 8 – упорный подшипник,
- 9 – гидроцилиндр осевой силы,
- 10 – датчик осевого усилия,
- 11, 12 – электровыводы,
- 13 – один из манометров.

Мультипликатор

$$p_1 = p_2 \cdot (s_2 / s_1)$$



Основные технические данные установки

- максимальное давление внутри камеры 500 МПа;
- максимальная осевая сила 750 кН;
- максимальный крутящий момент 10 кН·м;
- максимальные размеры трубчатого образца $D = 40$ мм, $L = 170$ мм;
- наружные размеры камеры высокого давления 380x380x570 мм

Вопросы для самоконтроля

Трубчатые образцы при сложном напряженном состоянии

1. Какими нагрузками надо нагрузить трубчатый образец, чтобы в стенке возникли равные по величине растягивающие напряжения?
2. Какими нагрузками надо нагрузить трубчатый образец, чтобы в стенке возникли равные по величине сжимающие напряжения?
3. Какими нагрузками надо нагрузить трубчатый образец, чтобы в стенке возникли только окружные растягивающие напряжения?
4. Какими нагрузками надо нагрузить трубчатый образец, чтобы в стенке возникли касательные и осевые растягивающие напряжения?
5. Как осуществляется герметизация внутренней полости образца в приспособлении для создания в трубчатом образце трехосного напряженного состояния?
6. Как передается на образец крутящий момент в приспособлении для создания в трубчатом образце трехосного напряженного состояния?
7. С какой целью при сжатии трубчатый образец вставляется в платформы с небольшой конусностью?
8. Как нужно нагрузить трубчатый образец для создания в стенках его трехосного напряженного состояния?
9. Как создается в установке на трехосное нагружение давление до 5000 атм?
10. Для чего нужен мультипликатор и что он представляет собой?
11. Для чего нужен гермовывод и что он представляет собой?

Кольцевые образцы

«ГОСТ 25.603-82. Методы механических испытаний композ. материалов с полимерной матрицей. Метод испытания на растяжение кольцевых образцов при нормальной, повышенной и пониженной температурах.»

Определяемые характеристики – предел прочности при растяжении, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Рекомендуемые размеры образцов (допускаются отклонения):

- внутренний диаметр 150,1 мм,
- ширина 8 мм,
- толщина 2 мм.

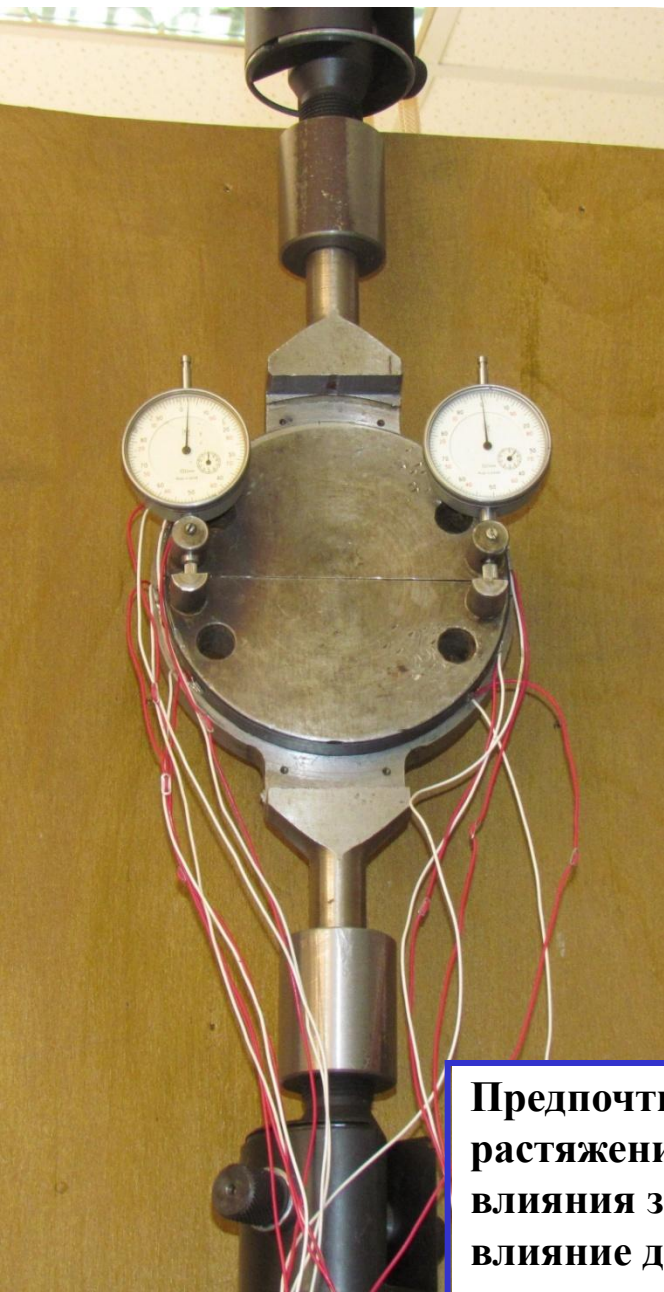
Схема армирования:

в основном кольцевая намотка, допускаются иные.

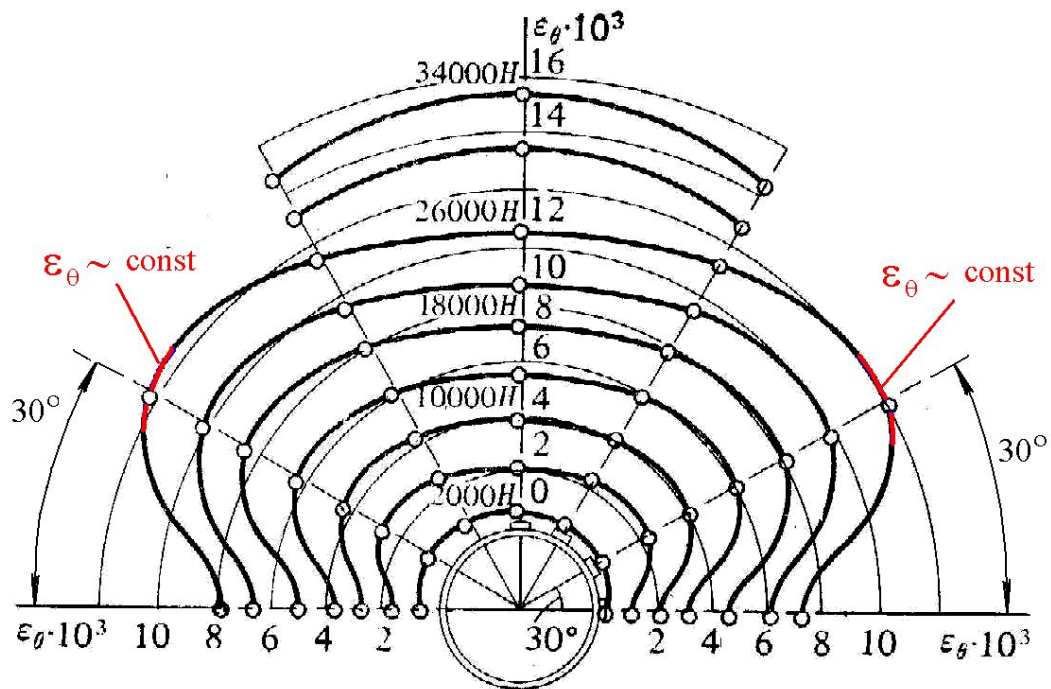
Слишком тонкие образцы (мало витков) – опасность разрушения размоткой (рекомендуется – не менее 10 витков); слишком толстые – больше неоднородность напряжений по толщине, особенно – в зоне щели.

При увеличении относительной толщины кольца и при уменьшении модуля сдвига по отношению к модулю упругости концентрация изгибных напряжений вблизи щели уменьшается.

Предпочтительные цели испытаний – определение характеристик при растяжении вдоль волокон, особенно – при сравнительном анализе влияния заданных факторов (технологический контроль свойств, влияние добавок в связующее, влияние внешних условий, например, температуры испытаний и т.д.)



Напряжения и деформации на поверхности кольца вблизи краев полудисков

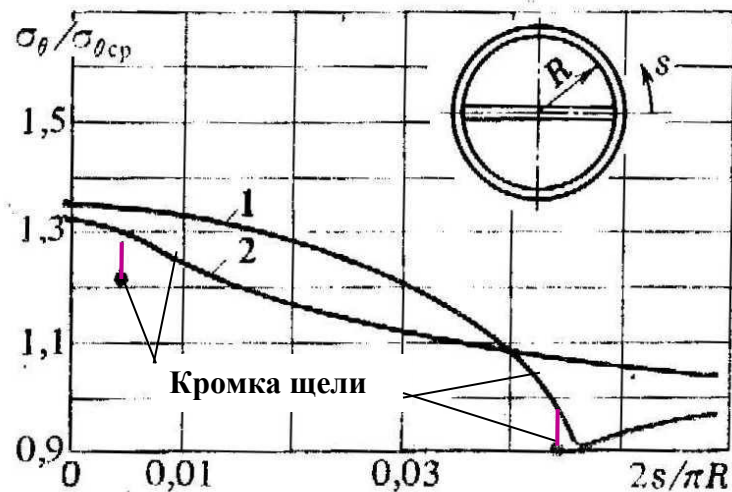


Деформации на наружной поверхности (результаты измерений с помощью тензодатчиков)

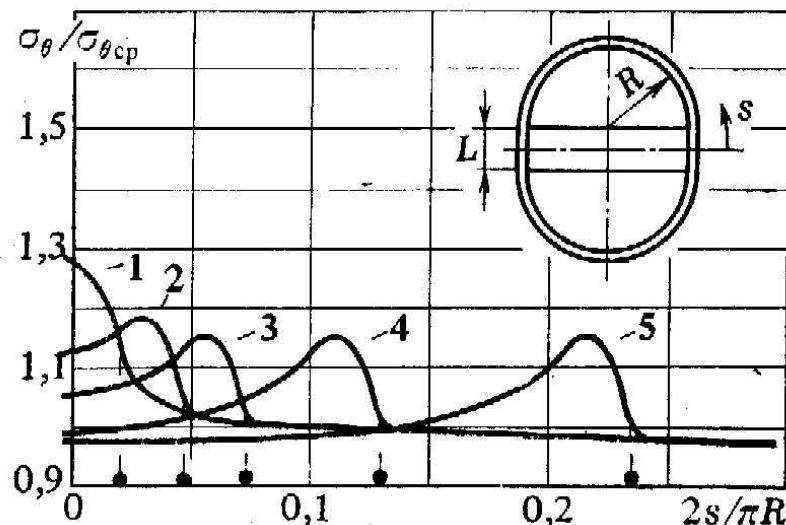
Предпочтительный угол наклейки тензодатчиков – $30^\circ \div 45^\circ$ от щели

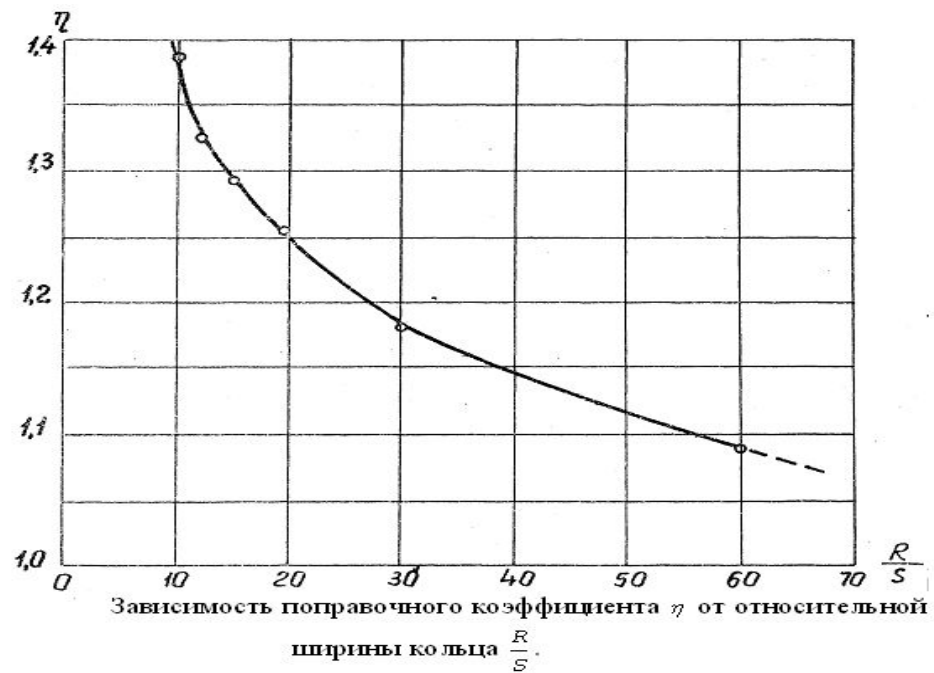
Напряжения на внутренней поверхности (решение в рамках упругости)

1 – стеклопластик, 2 - углепластик



Органопластик



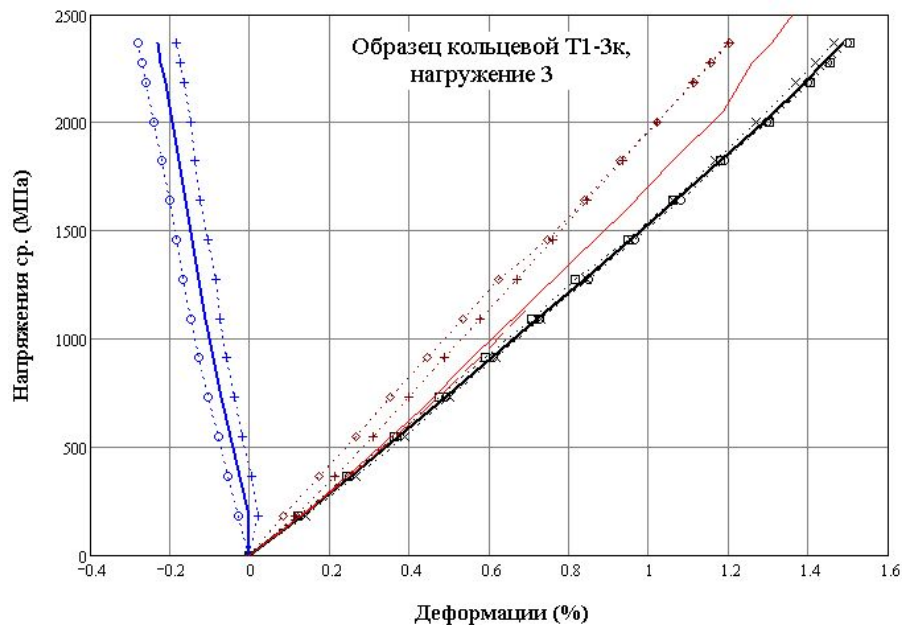
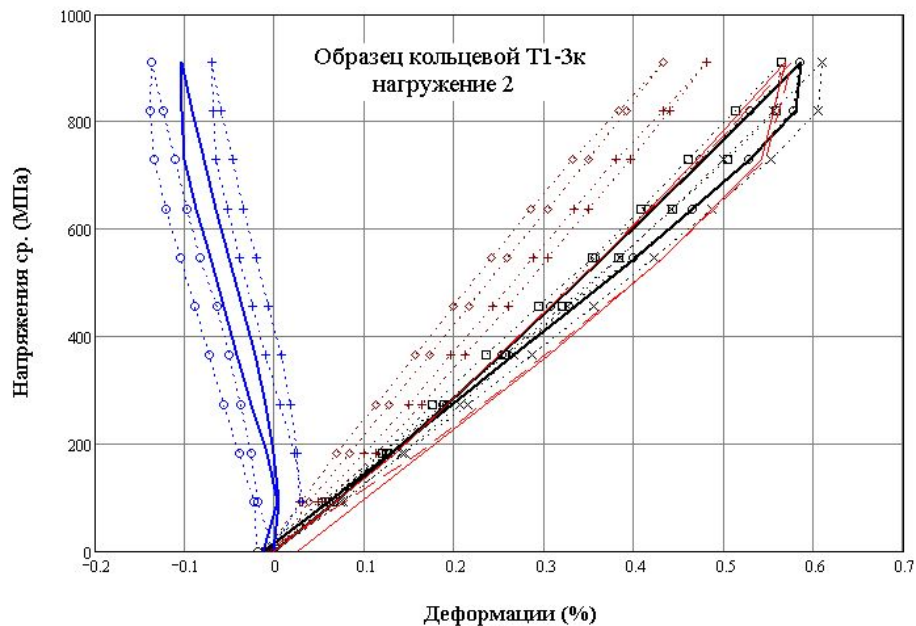


$$\sigma_{\dot{a}} = \frac{F}{2F} \cdot \eta,$$

где η -коэффициент, учитывающий снижение предела прочности вследствие изгиба в этом месте разрушения образца, берется по графику

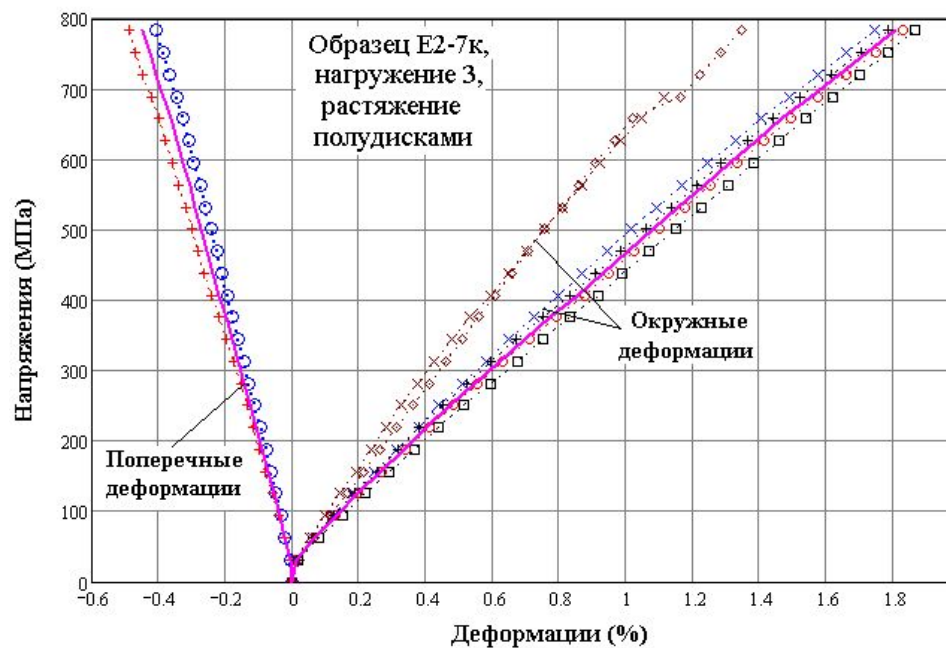
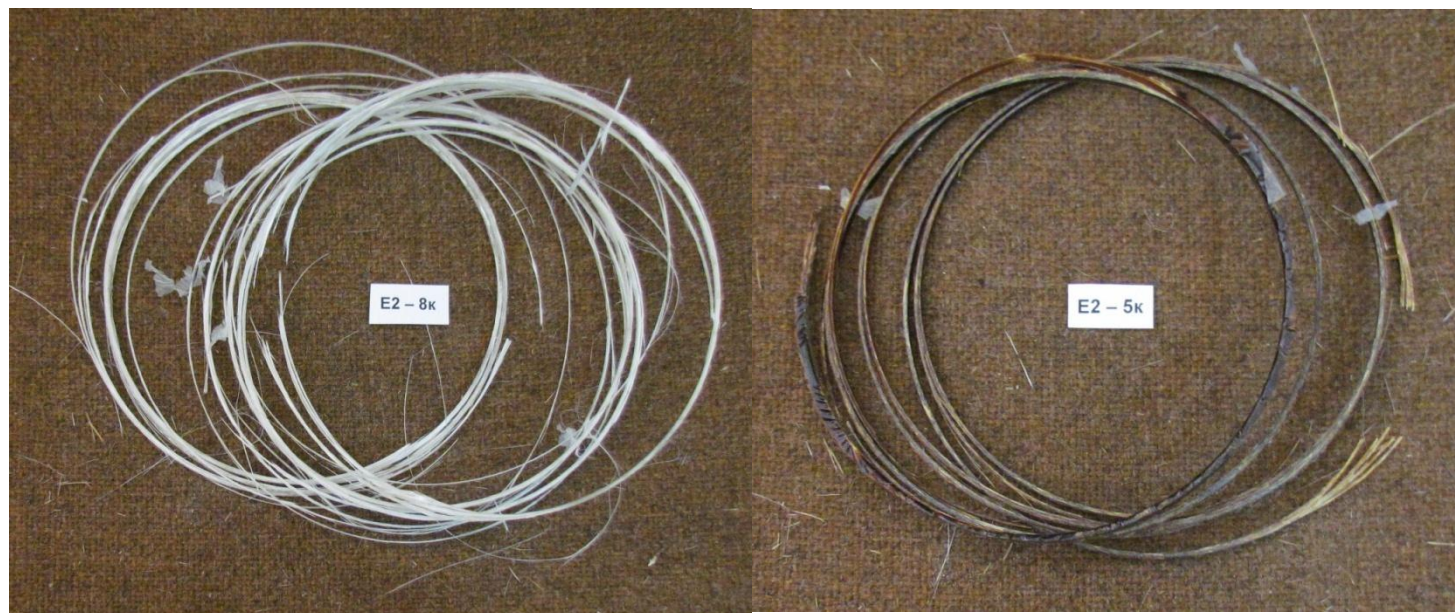
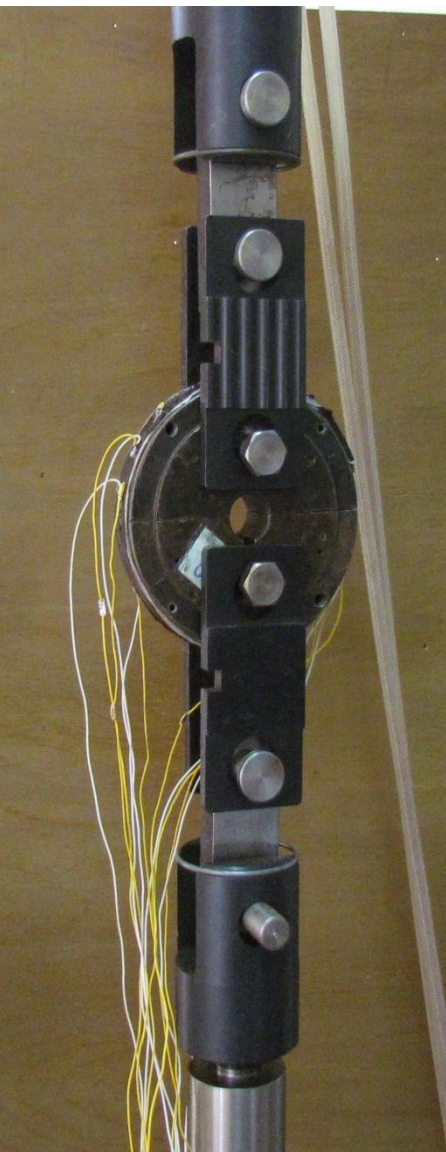
Результаты испытаний кольцевых образцов на растяжение

Углепластик на основе жгута 12к; $\sigma_{F_{+1}} = 2600$ МПа, $E_1 = 175$ ГПа, деформации - по тензода



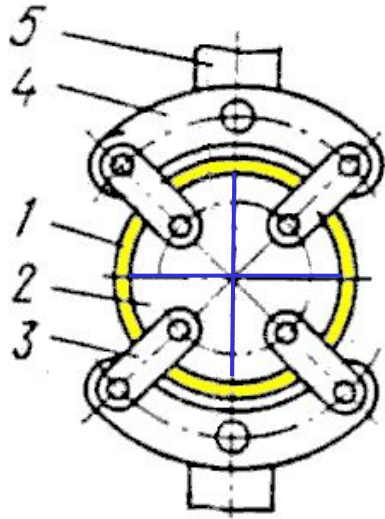
Результаты испытаний кольцевых образцов на растяжение

Стеклопластик на основе жгута Advantex; $\sigma F_{+1} = 1060$ МПа, $\sigma E_1 = 50$ ГПа

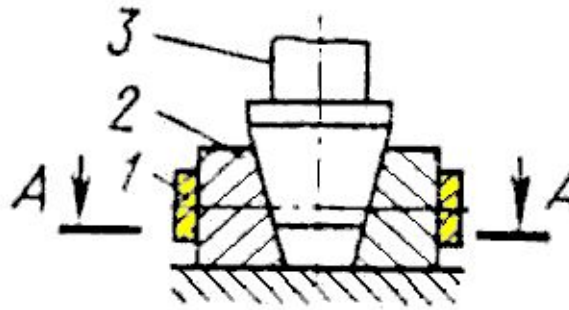


Полудиски - оправка

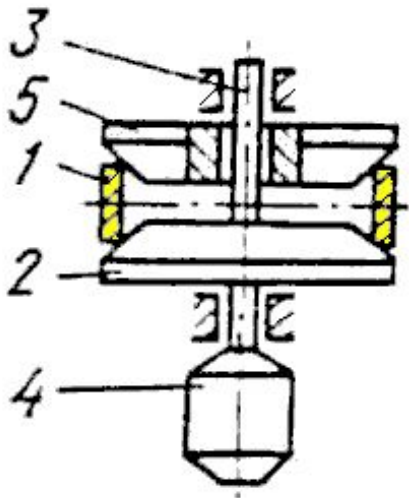
Варианты приспособлений для нагружения кольцевых образцов на растяжение



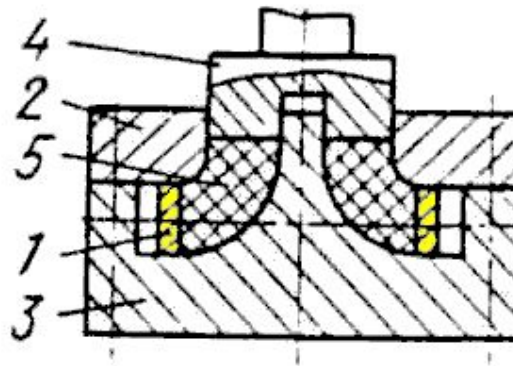
а)



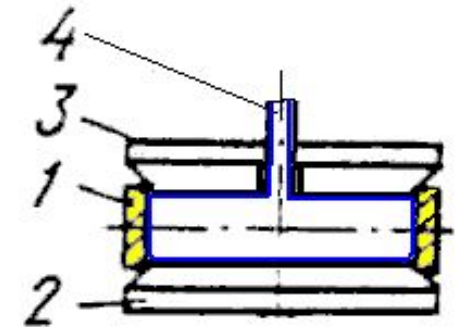
б)



г)



д)

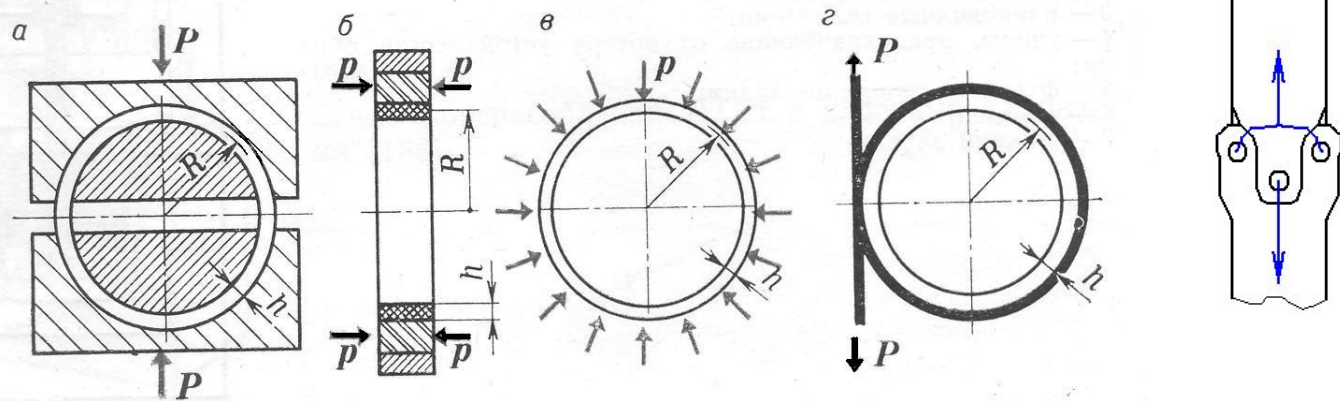


е)

Варианты приспособлений

для нагружения кольцевых образцов на сжатие (редко используется)

Определяемые величины	$E_{\theta}^{-}, \Pi_{\theta}^{-}$	$E_{\theta}^{-}, \Pi_{\theta}^{-}$	$E_{\theta}^{-}, E_r, \Pi_{\theta}^{-}$	$E_{\theta}^{-}, \Pi_{\theta}^{-}$
Силовые факторы	$P, \Delta u, \varepsilon_{\theta}^{-}$	$p, \varepsilon_{\theta}^{-}$	$p, \varepsilon_{\theta}^{-}$	$P, \varepsilon_{\theta}^{-}$
Геометрические размеры	$R/h, b, h$	$R/h, b, h$	$R/h, b, h$	$R/h, b, h$



Напряжения отслоения внутреннего слоя:

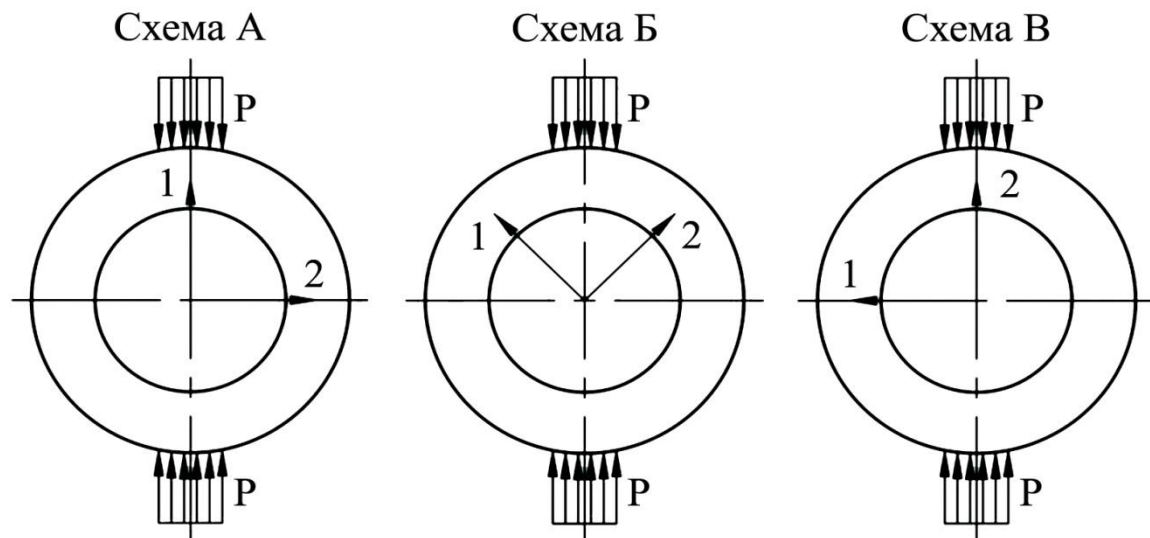
$$\sigma_{кр} = 0,916E_{\theta} \sqrt{\left(\frac{h_0}{R_{вн}}\right)^2 + 4,77 \frac{\gamma}{h_0 E_{\theta}}},$$

γ — удельная работа разрушения по Гриффитсу,

h_0 — толщина внутреннего (однонаправленного) слоя,

$R_{вн}$ — внутренний радиус кольца

Нагружение кольцевых образцов на сжатие с помощью индентора (при высоких температурах – около 2000°C – ОАО «Композит»)



Внешний диаметр 50 мм,
поперечное сечение 10x10 мм
Кольца изготовлены вырезкой
из плиты

Оси 102 – оси ортотропии, P – равнодействующая нагрузки, w – максимальный прогиб

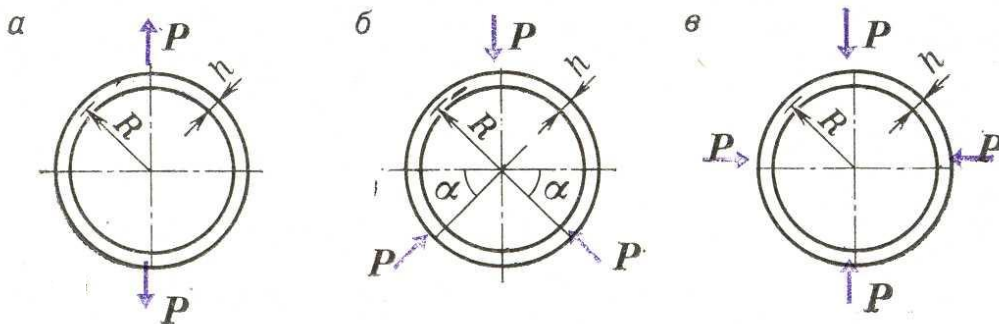
Последовательность определения модулей упругости E_1 , E_2 , G_{12} :

- экспериментальное определение $S^{\text{эксп}} = (w / P)$ для схем А, Б, В;
- расчет МКЭ – определение зависимости $S^{\text{теор}}$ от модулей, изменяющихся в некотором диапазоне;
- минимизация Φ (искомые модули – варьируемые параметры)

$$\Phi = \left(\frac{S_A^{\text{теор}} - S_A^{\text{эксп}}}{S_A^{\text{эксп}}} \right)^2 + \left(\frac{S_B^{\text{теор}} - S_B^{\text{эксп}}}{S_B^{\text{эксп}}} \right)^2 + \left(\frac{S_B^{\text{теор}} - S_B^{\text{эксп}}}{S_B^{\text{эксп}}} \right)^2.$$

Варианты нагружения сплошных кольцевых образцов при испытаниях на изгиб в плоскости кольца (аналог трехточечного изгиба)

Определяемые величины	$E_{\theta}^+, G_{\theta r}$	$E_{\theta}^+, G_{\theta r}$	$E_{\theta}^+, G_{\theta r}$
Силовые факторы	$P, \Delta w$	$P, \Delta w$	$P, \Delta w$
Геометрические размеры	$R/h, b, h$	$R/h, b, h$	$R/h, b, h$



Гипотезы:

- материал – однороден;
- прогибы малы;
- перемещения из плоскости кольца отсутствуют.

Изменение вертикального диаметра при нагружении по схеме **а** (**б**, **в** – редко исп-ся):

$$w_{\text{де max}} = 0,149 \frac{PR^3}{E_{\theta}J} \left[1 + 0,528\beta^2 \left(\frac{h}{R} \right)^2 \right], \quad \beta^2 = \frac{E_{\theta}}{G_{\theta r}}$$

P - нагрузка, $E_{\theta}J$ - изгибная жесткость в плоскости кольца,

h - толщина кольца,

R - средний радиус кольца

$$0,200 \geq \frac{h}{R} > 1,376 \sqrt{\frac{k_{\tau}}{1-k_{\tau}} \frac{G_{\theta r}}{E_{\theta}}}$$

$$\text{где } k_{\tau} = \frac{w_{\tau}}{w_0} = 0,528 \beta^2 \left(\frac{h}{R} \right)^2,$$

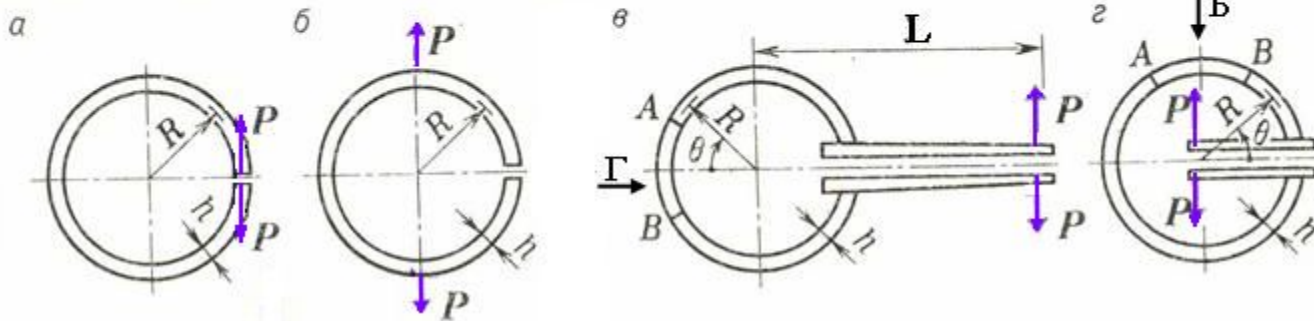
Резерв увеличения точности – измерение деформаций на поверхности кольца, использование численных методов расчета НДС

Варианты нагружения разрезных кольцевых образцов при испытаниях на изгиб в плоскости кольца

Определяемые величины	E_{θ}^+	E_{θ}^+	Π_r^+	$\Pi_{\theta r}$
Силовые факторы	P, u_p	P, w_p	P	P
Геометрические размеры	$R/h, b, h$	$R/h, b, h$	$R/l, b, h$	b, h

Гипотезы:

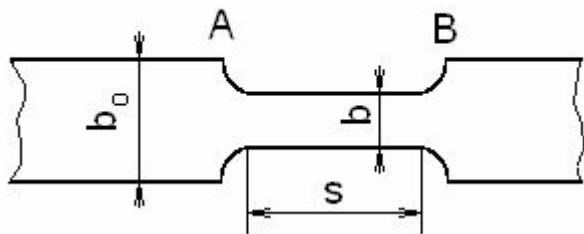
- материал – однороден;
- прогибы малы (линейно упругая задача);
- перемещения из плоскости кольца отсутствуют.



Гипотеза для а), б), в): влияние сдвига на перемещения пренебрежимо мало по сравнению с влиянием изгибных напряжений

Радиальные и касательные напряжения при нагружении по схеме г (определение прочности при межслойном сдвиге):

Вид Б, Г



$$\sigma_r^+ = \frac{3}{2} \frac{M}{bhR}, \quad \tau_{\theta r} = \frac{3Q}{2bh}$$

где $Q = P \sin \theta$, $M = PR \cos \theta$

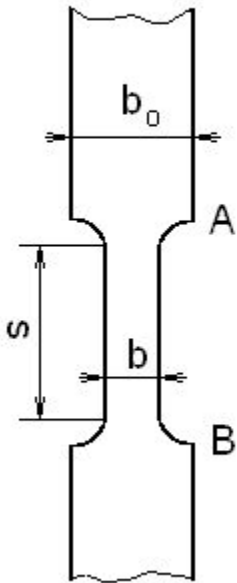
при $\theta = 90^\circ$ $Q = P$, $M = 0$

Проверка метода: материал – стеклопластик, $R = 75$ мм, $b_0 = 15$ мм, $b = 8$ мм, $h = 20$ мм, $s = 50$ мм, при $\theta = \pi$ (M_{\max})

Максимальные радиальные и касательные напряжения при нагружении по схеме В (определение прочности при растяжении поперек слоев):

46

Вид Г



$$\sigma_{r \max}^+ = \frac{3}{2} \frac{PL}{bhR} \left[1 + \frac{R}{L} \cos \theta \right], \quad \tau_{\theta r \max} = \frac{\sin \theta}{L/R + \cos \theta} \sigma_{r \max}^+,$$

разруш. "отрыв" при $\frac{h}{R} > \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$,

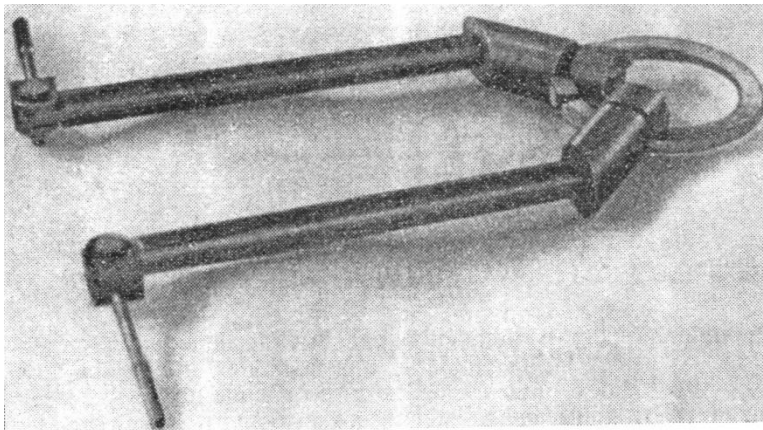
$$\text{при } \theta = 0 \quad \sigma_{r \max}^+ = \frac{3}{2} \frac{PL}{bhR} \left[1 + \frac{R}{L} \right], \quad \tau_{\theta r \max} = 0,$$

Π_r^+ - прочность на межслойный отрыв,

Π_θ - прочность на растяжение или сжатие
в окружном направлении

Гипотезы:

- материал – однороден;
- прогибы малы
(линейно упругая задача);
- перемещения из плоскости кольца
отсутствуют.



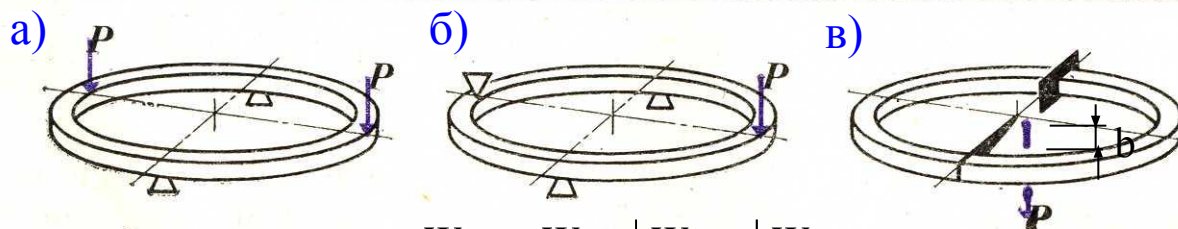
Проверка метода: материал – стеклопластик,
 $R = 75$ мм, $b_0 = 15$ мм, $b = 8$ мм, $h = 20$ мм,
 $s = 50$ мм, $L = 600$ мм, ставился стальной хомутик
 в зоне максимального сдвига.

Варианты нагружения сплошных кольцевых образцов
при испытаниях на кручение
(аналог кручения образца-полоски – см. следующий слайд)

Определяемые величины	См. раздел 4.10.2	$G_{\theta r}, G_{\theta z}$	$G_{\theta r}, G_{\theta z}$
Силовые факторы	Не реком. для исп.	P, w	P, w
Геометрические размеры	—	$R/h, b/h$	$R/h, b/h$

Гипотезы:

- материал – однороден;
- прогибы малы (линейно упругая задача);
- перемещения из плоскости кольца отсутствуют.



$$W_{\text{вр}} = W_{\text{изг}} + W_Q + W$$

б), в) $w_{\text{изг}}$ пренебрежимо малы при $E_{\theta} / G_{\theta z} > 20$ и $b/h > 5$;
 w_Q пренебрежимо мала, если при $b/h = 5 \div 10$ $R/h > 12$ для б)
и $R/h > 8$ для в)

Жесткость при кручении

$$C = \frac{m}{2w_p / PR^3 - n / E_{\theta} J}, \quad \text{где } m = 0,0379, \quad n = 0,467 \text{ для б)}$$

и $m = 0,142, \quad n = 0,571$ для в)

Связь $C = f(G_{\theta r}, G_{\theta z})$ – по формулам для плоских стержней – слайд 17 в Ex_lek2-14

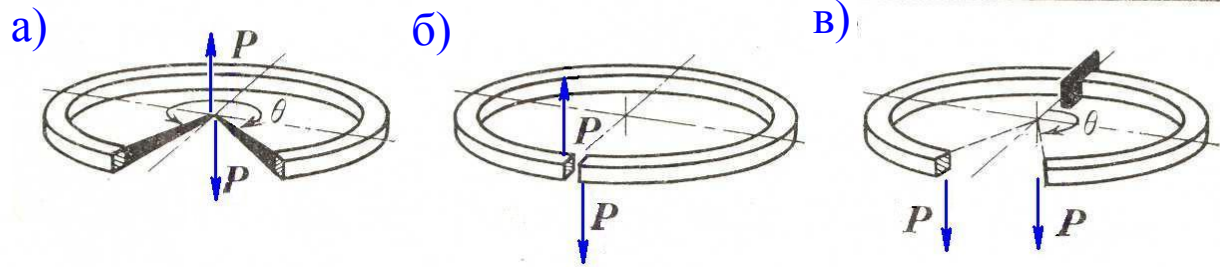
Для определения двух модулей сдвига необходимо испытать кольца с двумя или более разными размерами сечений

Варианты нагружения разрезных кольцевых образцов при испытаниях на кручение

Определяемые величины	$G_{\theta r}, G_{\theta z}$	$G_{\theta r}, G_{\theta z}$	$G_{\theta r}, G_{\theta z}$
Силовые факторы	P, w	P, w	P, w
Геометрические размеры	$R/h, b/h$	$R/h, b/h$	$R/h, b/h$

Гипотезы:

- материал – однороден;
- прогибы малы;
- перемещения из плоскости кольца отсутствуют.



$$W_{\text{кр}} = W_{\text{изг}} + W_Q + W$$

$$C = \frac{3}{w_p / \pi P R^3 - 1 / E_{\theta} J}$$

а) $w_{\text{изг}} = 0, w_Q / w_{\text{кр}} < 0,015; C = \frac{P R^3}{w_p} \theta$

б) $w_Q / w_{\text{кр}} < 0,01, w_{\text{изг}} / w_{\text{кр}} < 0,03$ при $E_{\theta} / G_{\theta z} = 5 \div 10$ и $b/h > 3;$

в) при $\theta = \pi$ аналогична б), при $\theta < \pi$ значительно хуже, чем б)

Связь $C=f(G_{\theta r}, G_{\theta z})$ – по формулам для плоских стержней – слайд 17 в Ex_lek2-14

Для определения двух модулей сдвига необходимо испытать кольца с двумя или более разными размерами сечений

Вопросы для самоконтроля

Кольцевые образцы

1. При какой технологии изготовления композитов предпочтительно использование кольцевых образцов для экспериментальных исследований свойств композита?
2. Какой главный недостаток испытаний кольцевых образцов на растяжение?
3. Как можно измерять деформации при растяжении кольцевого образца для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона?
4. Какой характер разрушения образца говорит о том, что причина разрушения – достижение предела прочности при растяжении в окружном направлении?
5. Каковы главные трудности при испытаниях кольцевых образцов на сжатие?
6. Какие характеристики материала можно определить при нагружении сплошного кольцевого образца сосредоточенными нагрузками в плоскости кольца?
7. На каких кольцевых образцах можно определить прочность при межслойном сдвиге?
8. На каких кольцевых образцах можно определить прочность при растяжении в радиальном направлении?
9. Какие характеристики можно определить при нагружении кольцевых образцов (сплошных и разрезных) сосредоточенными нагрузками, перпендикулярными плоскости кольца?

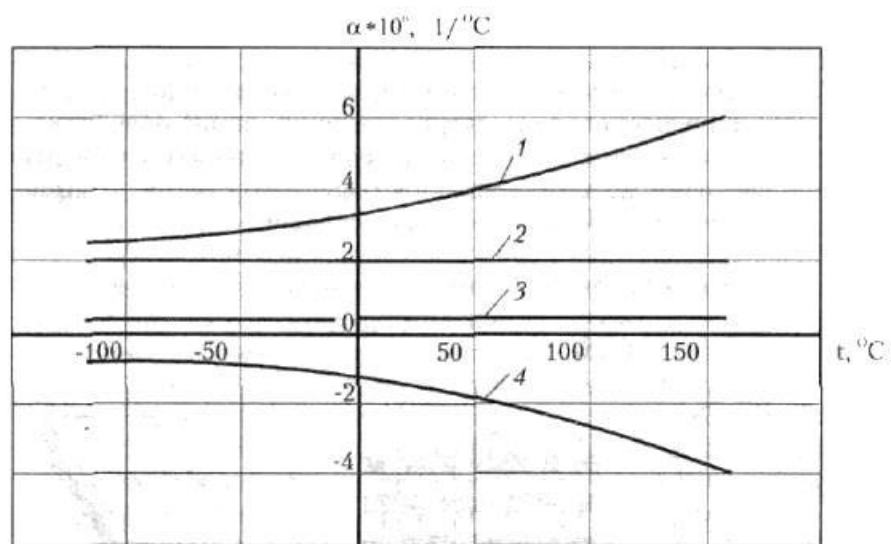


Рис. 6.19. Зависимость коэффициента линейного термического расширения двух- и трехкомпонентных композиционных материалов от температуры:
 1 – стеклопластик, 2 – стеклоуглепластик; 3 – органоуглепластик, 4 – углепластик