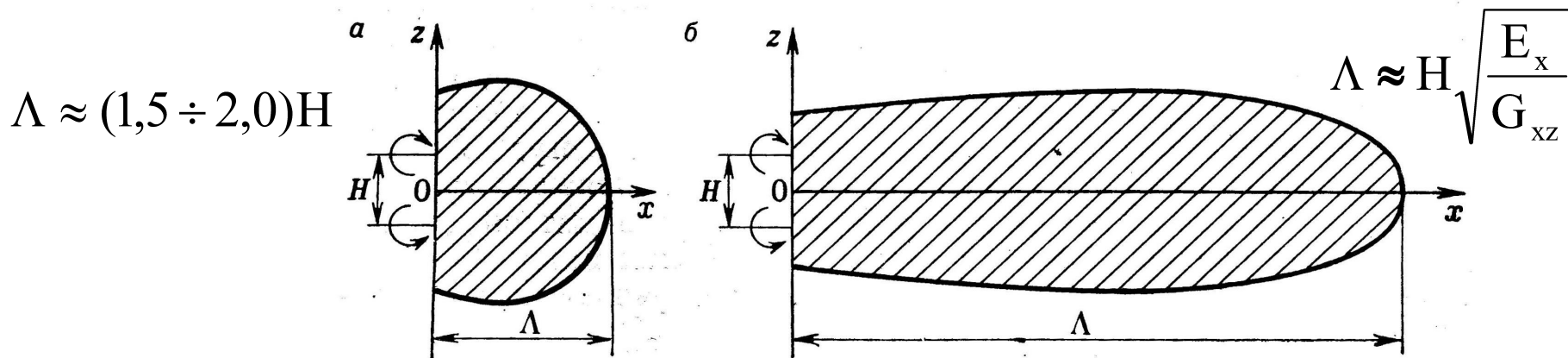


Гипотезы в инженерном эксперименте – основа правильной интерпретации результатов эксперимента

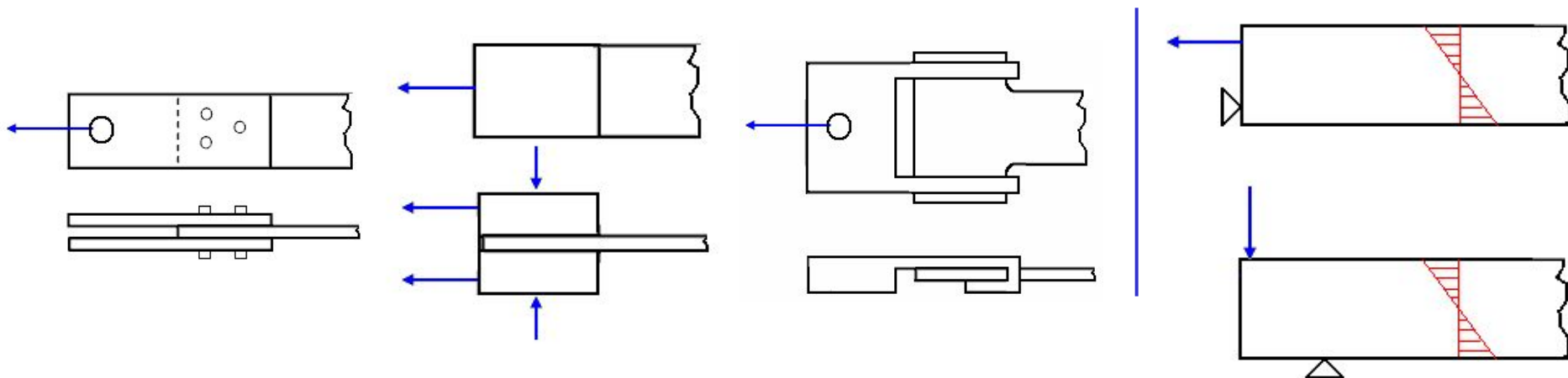
Принцип Сен-Венана



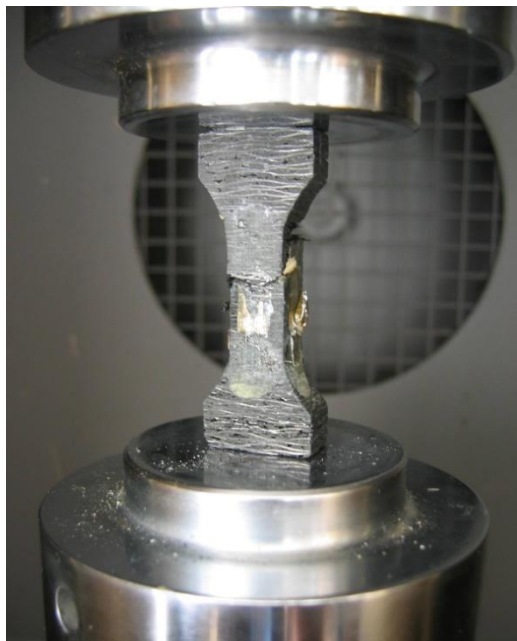
Затухание возмущений в изотропном (а) и анизотропном (б) материале
(H – характерный размер источника возмущения - для стержней – больший из размеров поперечного сечения)

Растяжение

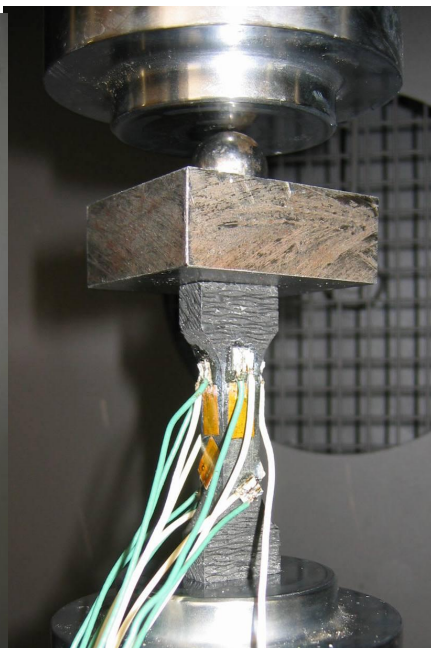
Изгиб



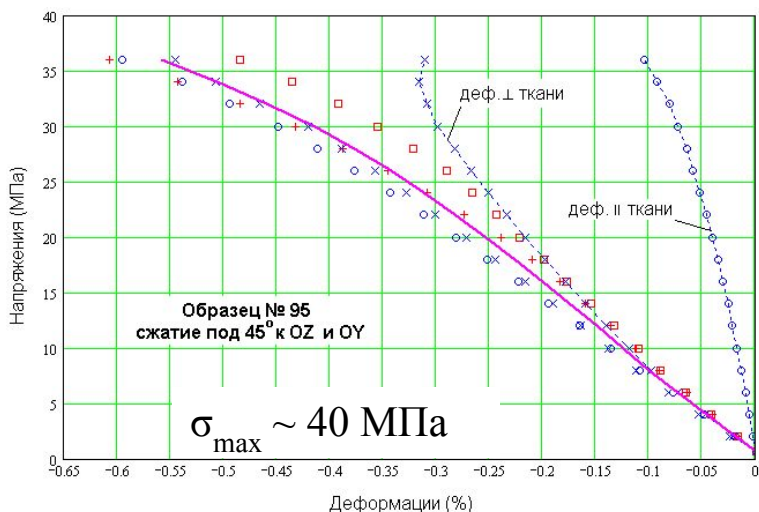
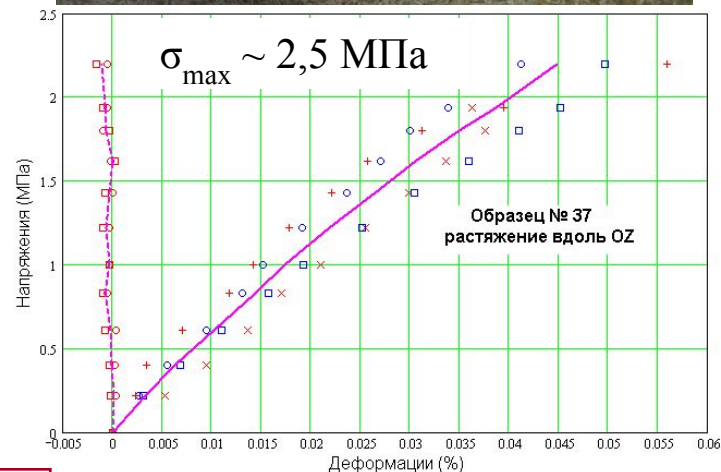
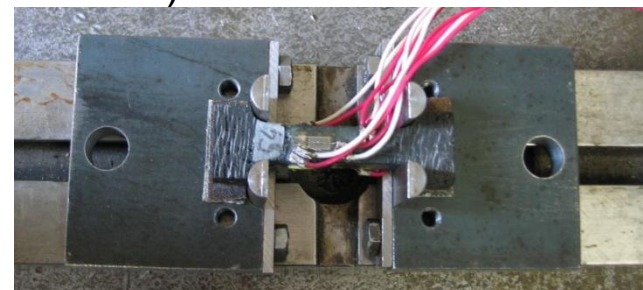
Определение характеристик упругости и прочности в направлении, **перпендикулярном плоскости армирования** и под углом 45° к ней (углерод-углеродный КМ) на коротких образцах (длина 55 – 65 мм)



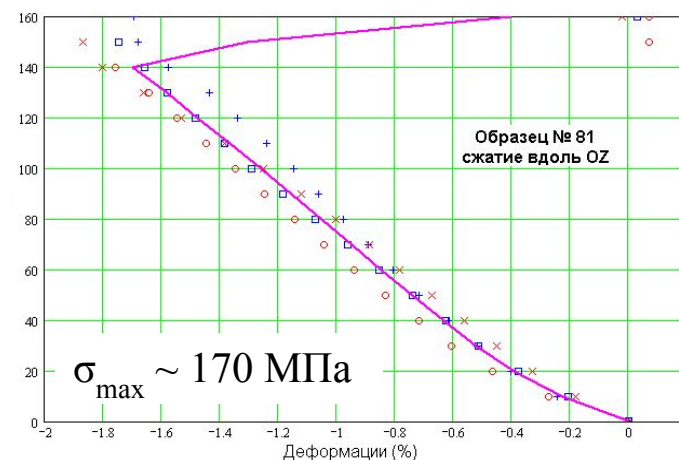
Перпендикулярно ткани



Под углом 45° к ткани

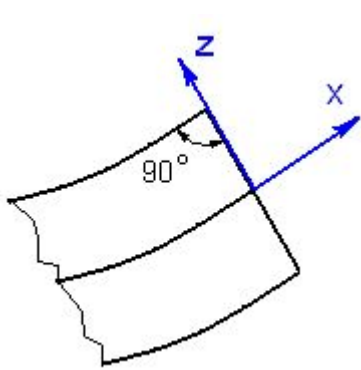


**Определяемые хар-ки
поперек плоск. армир.:
модуль упругости,
модуль сдвига,
прочность при сжатии
и растяжении,
по прочности
на сжат. под углом 45°
к ткани – прочность
при сдвиге**

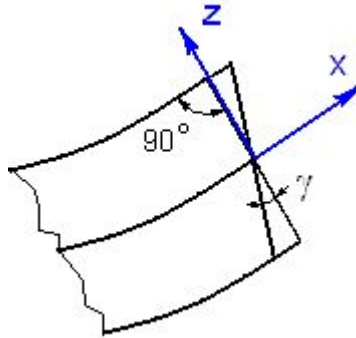


Определение модуля сдвига в направлении поперек плоскости армирования при изгибе

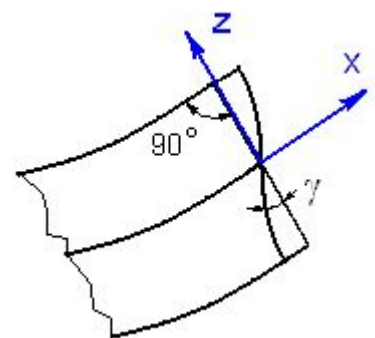
Кинематические гипотезы при изгибе



$$u = \frac{dw}{dx} z$$



$$u = \frac{dw}{dx} z - \gamma(x)$$

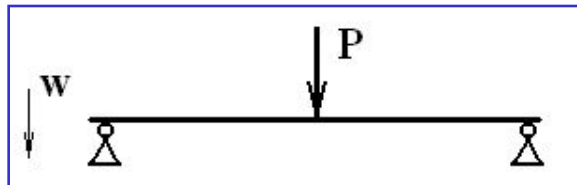


$$u = \frac{dw}{dx} z - \gamma(x, z)$$

u – перемещения в направлении оси x , w – перемещения в направлении оси z .

Соотношения для максимального прогиба – для трехточечного изгиба стержня

$$\frac{48Jw_{\max}}{PL^3} = \frac{1}{E_x}$$

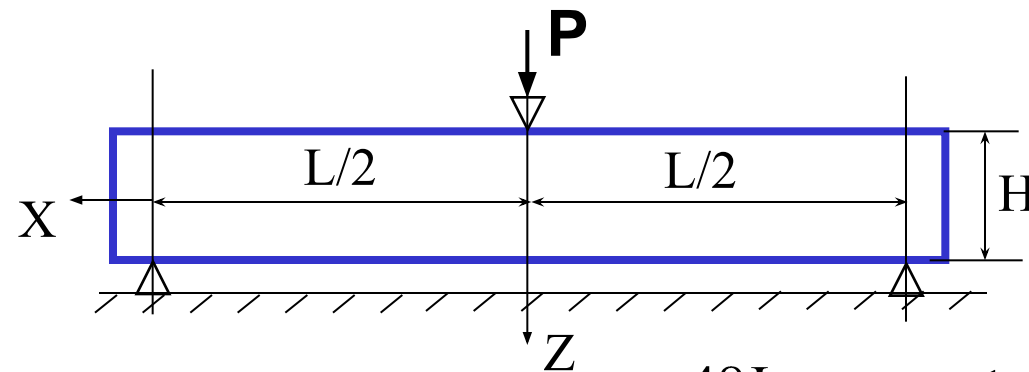


$$\frac{48Jw_{\max}}{PL^3} = \frac{1}{E_x} \left[1 + \frac{1,2 E_x}{G_{xz}} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right]$$

$$\frac{48Jw_{\max}}{PL^3} = \frac{1}{E_x} \left[1 + \frac{E_x}{G_{xz}} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right]$$

Пример 1. Трехточечный изгиб стержня

Влияние размеров стержня на точность определения модуля сдвига по прогибу



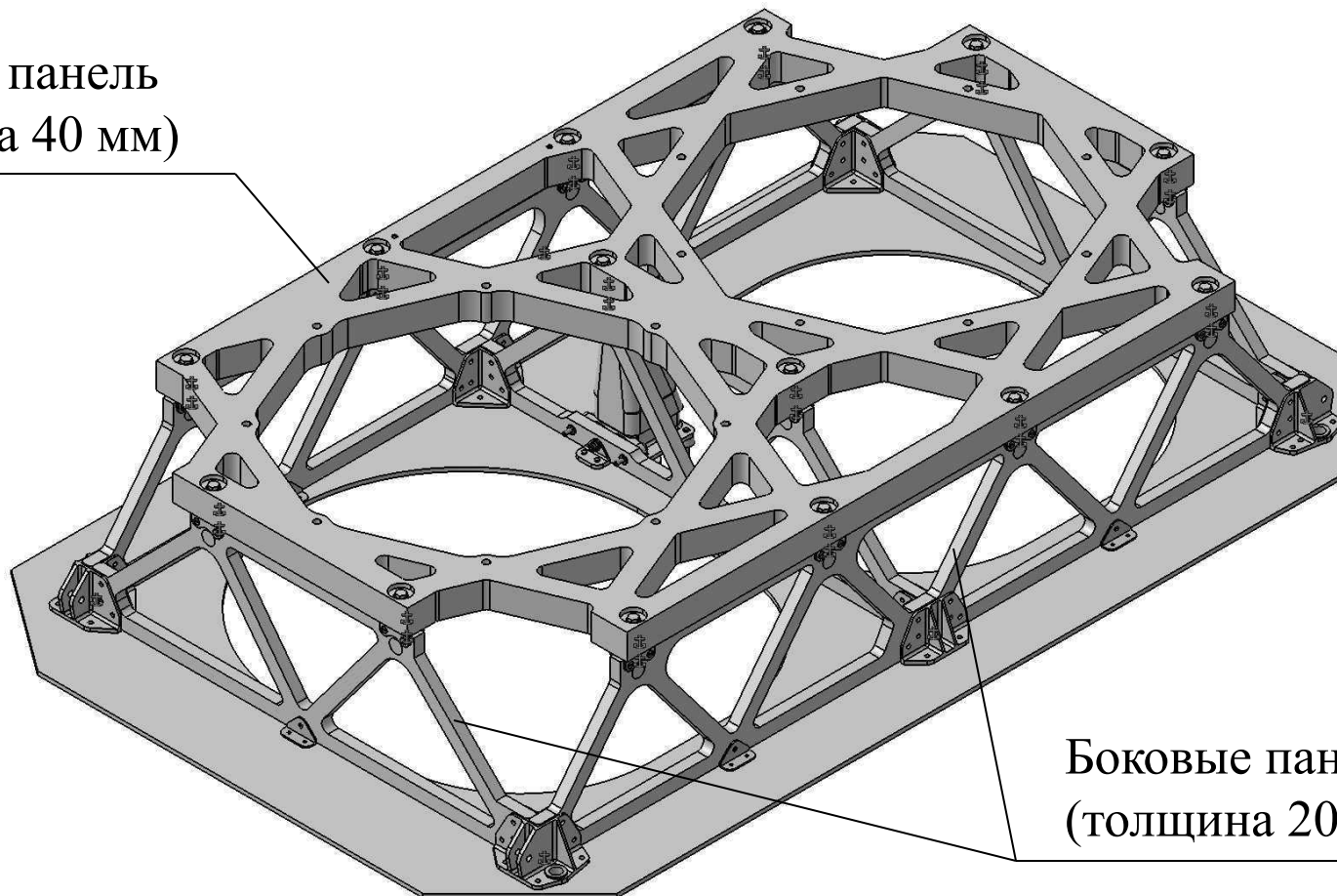
$$\frac{48Jw_{\max}}{PL^3} = \frac{1}{E_x} \left[1 + \frac{1,2E_x}{G_{xz}} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \right]$$

$$\frac{48Jw_{\max}}{PL^3} = \frac{1}{E_x} (1 + k_\tau) \quad \frac{L}{H} = 1,095 \sqrt{\frac{1}{k_\tau} \cdot \frac{E_x}{G_{xz}}}$$

№ вар.	1	2	3	4	5	6
Матер.	Углепл. однонапр.		Углепл. квазиизотр.		Стеклопл. одн.	
E_x (ГПа)	170	170	55	55	57	57
G_{xz} (ГПа)	5	5	3,5	3,5	5,2	5,2
k_τ	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5
L/H	11,7	9,0	7,9	6,1	6,6	5,1

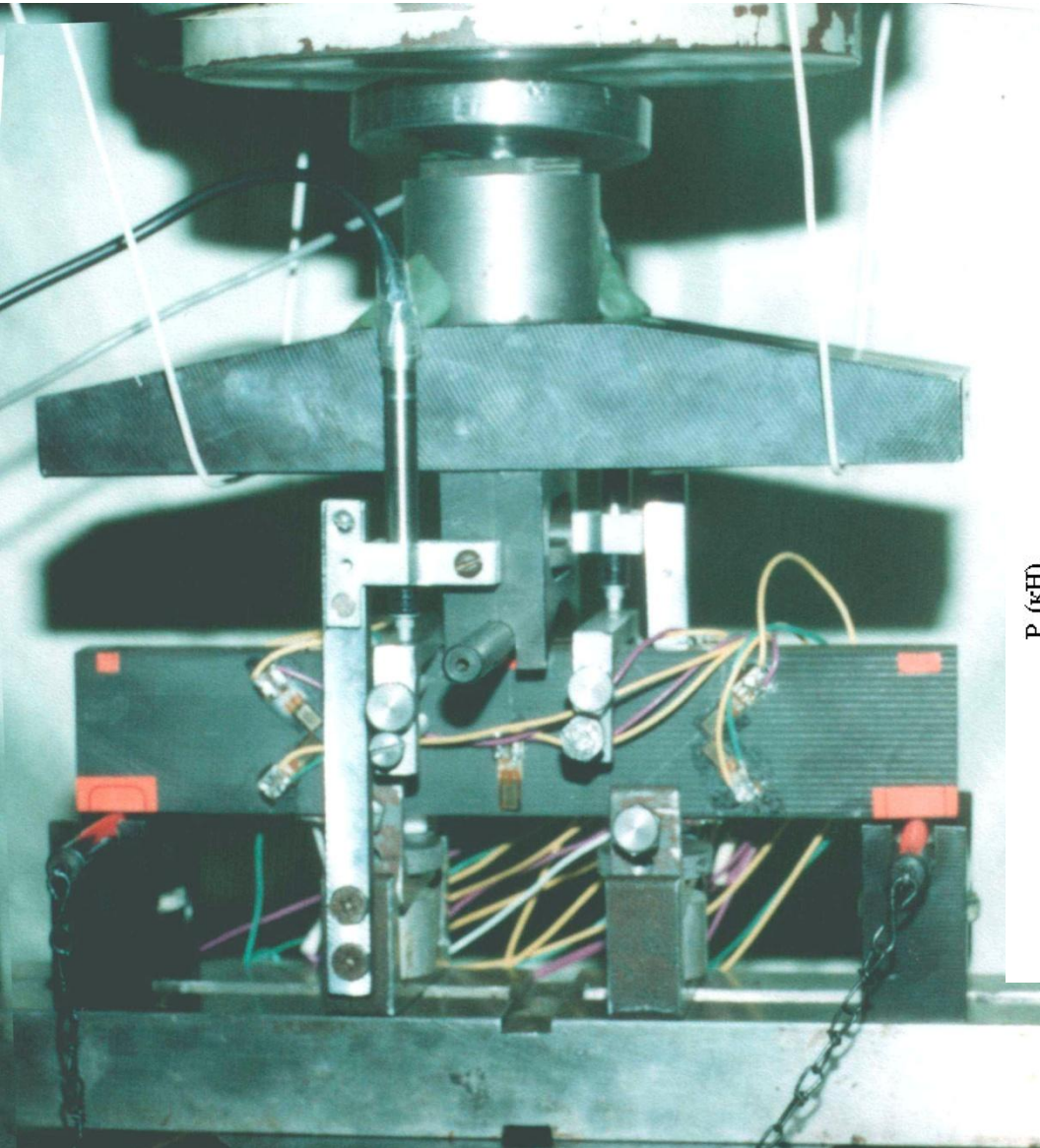
**Размеростабильная несущая конструкция из углепластика
для размещения оптической аппаратуры - пример использования
углепластиковых стержней толщиной 20 мм и 40 мм
[габаритные размеры конструкции примерно (0,7х 1,2 х 0,25) м]**

Верхняя панель
(толщина 40 мм)

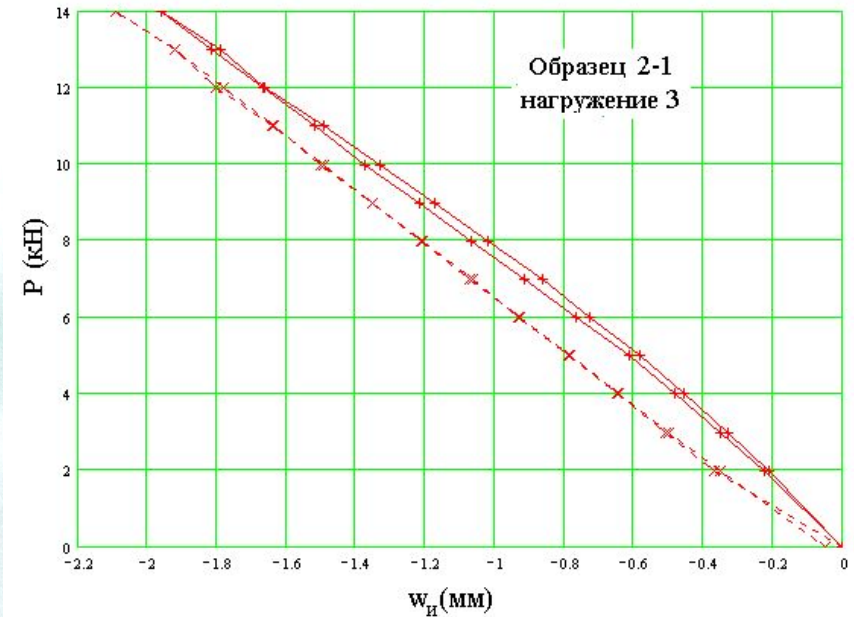


Боковые панели
(толщина 20 мм)

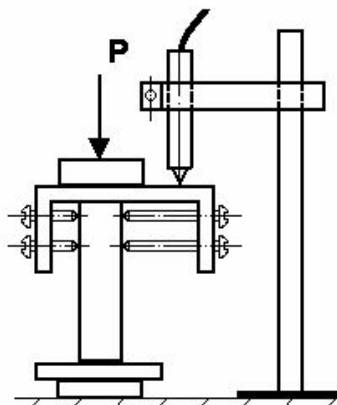
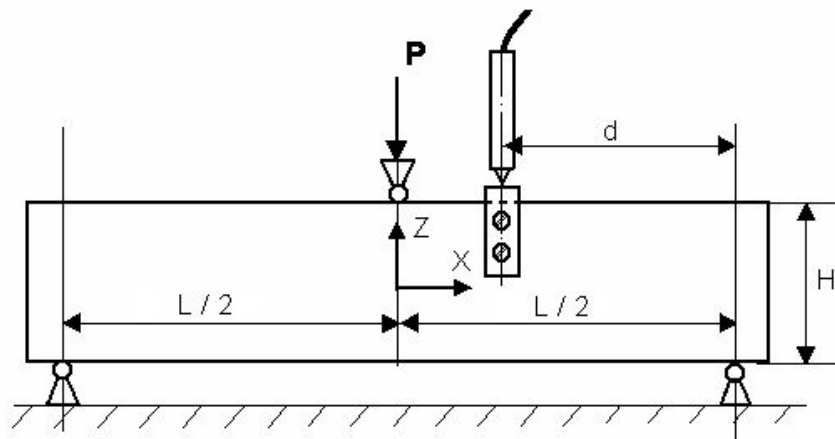
Эксперимент – трехточечный изгиб (испытательная машина EU-40)



Типичные
экспериментальные зависимости
прогиба от приложенной нагрузки,
измеренные двумя измерителями
перемещений



Экспериментальные данные по определению прогибов при поперечном изгибе



$$\frac{T}{K} = \frac{1}{E_x} + \frac{M/K}{G_{xz}}$$

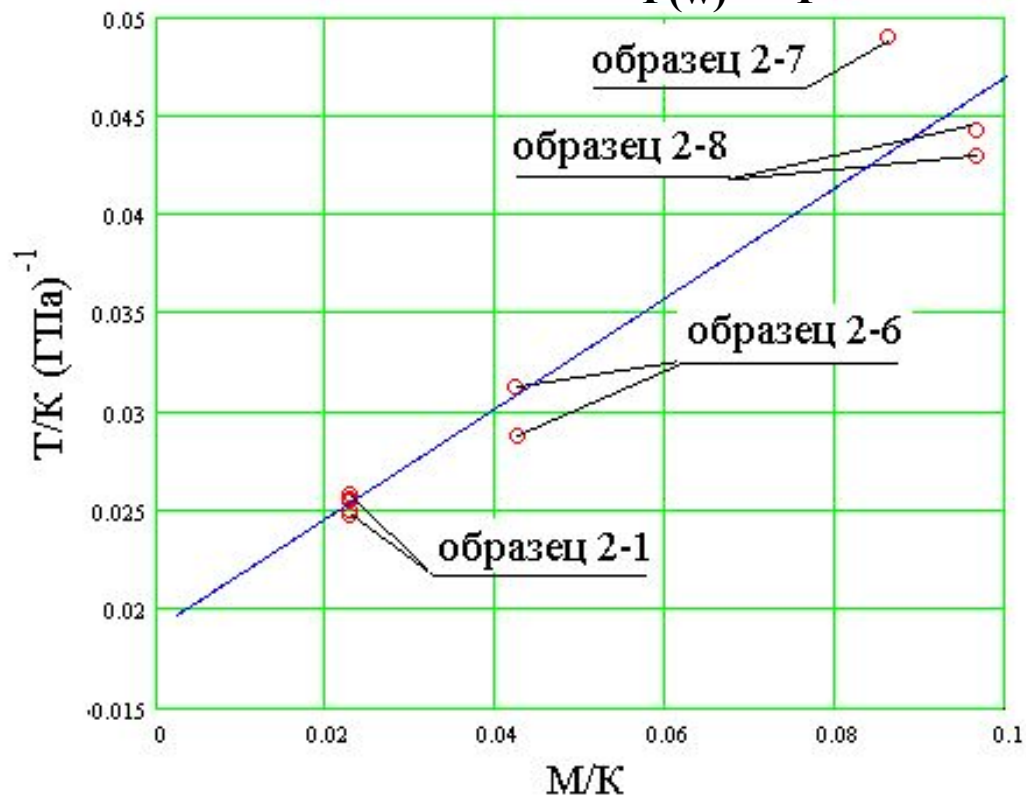
Каждая точка – результат
линейной аппроксимации
 $P(w) \rightarrow T$

$$T = \frac{J_x w|_{L/2-d}}{(P/2)(L/2)^3}$$

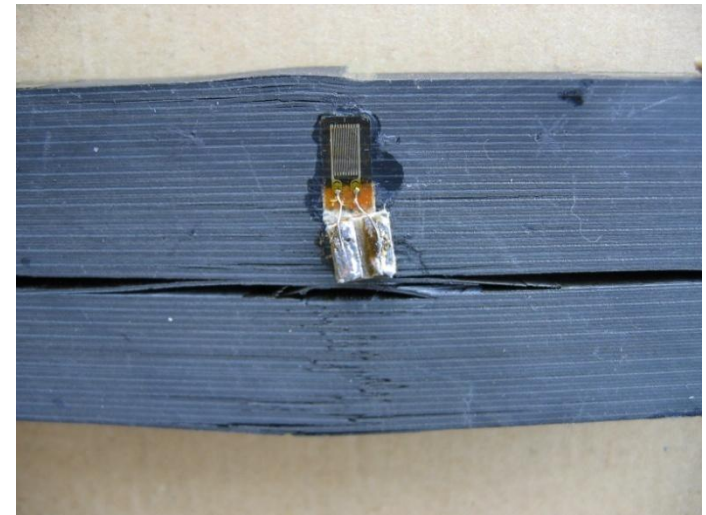
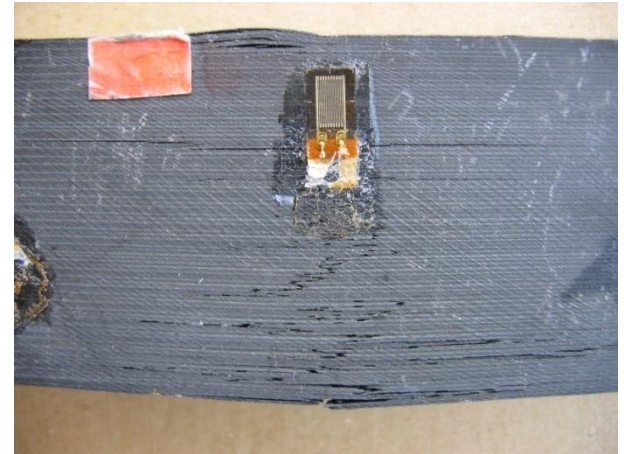
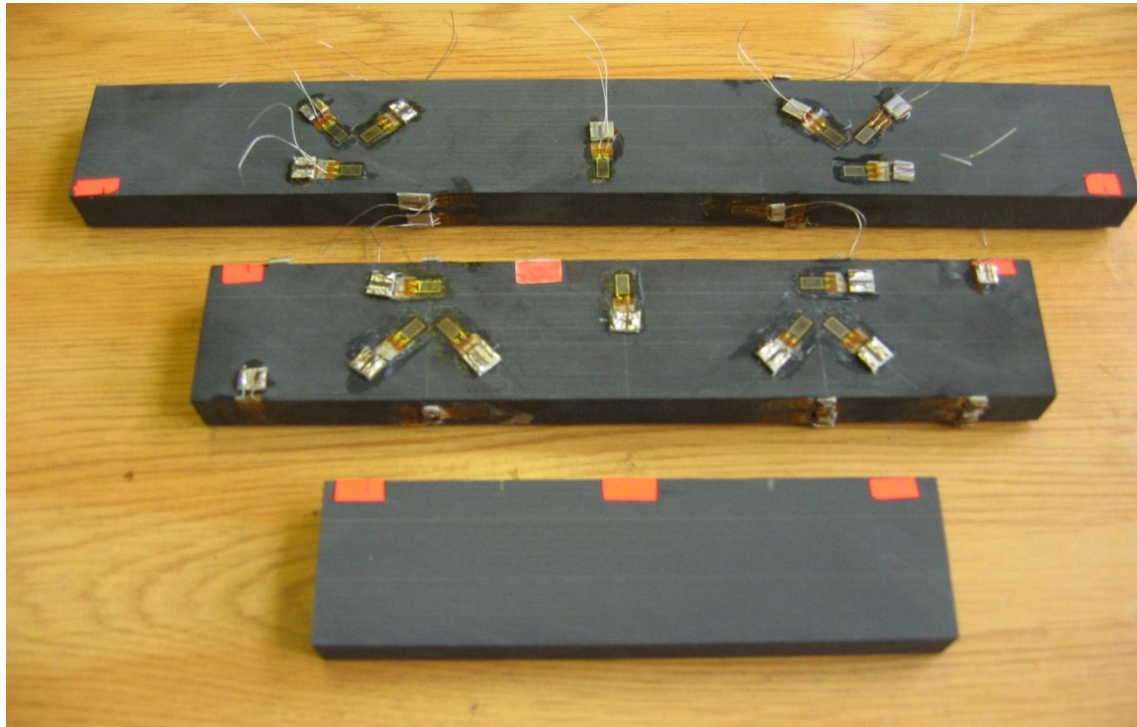
$$K = \frac{1}{2}[1 - t_{\text{н}}^2] - \frac{1}{6}[1 - t_{\text{н}}^3]$$

$$M = \frac{\alpha}{12} \left(\frac{H}{L/2} \right)^2 [1 - t_{\text{н}}]$$

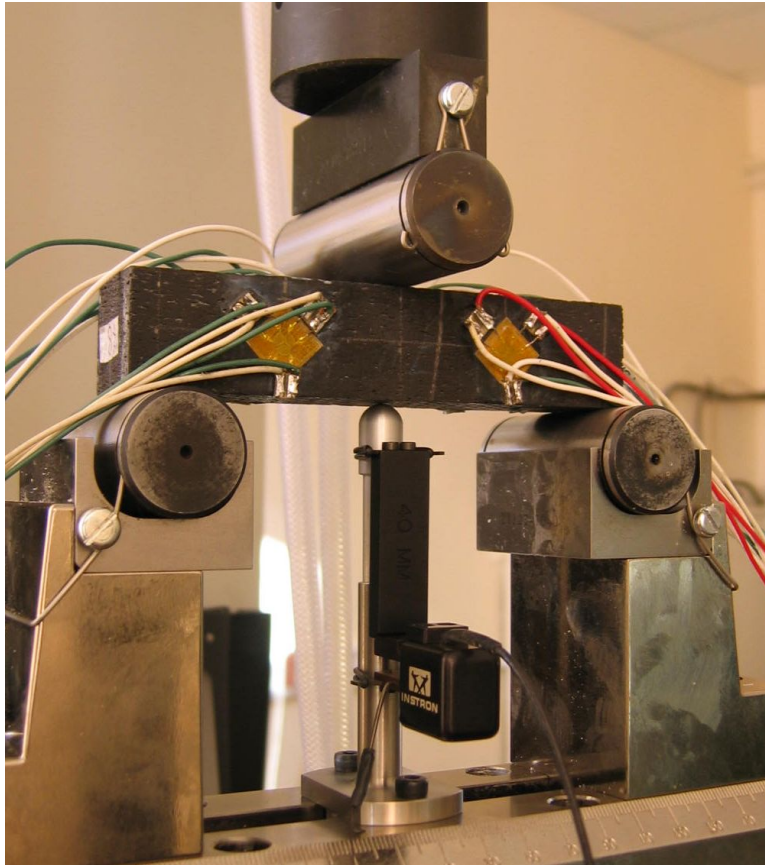
$$t_{\text{н}} = \left(\frac{L/2 - d}{L/2} \right)$$



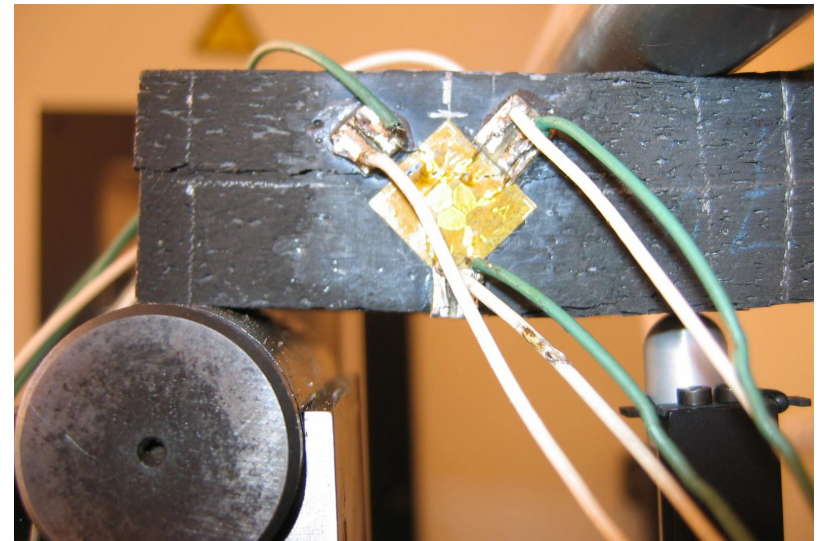
Вид образцов высотой 40 мм из углепластика
для испытаний на трехточечный изгиб



Вид образцов высотой 25 мм из углерод-углеродного КМ при испытаниях на трехточечный изгиб



Перед началом нагружения,
испытательная машина Instron-8801



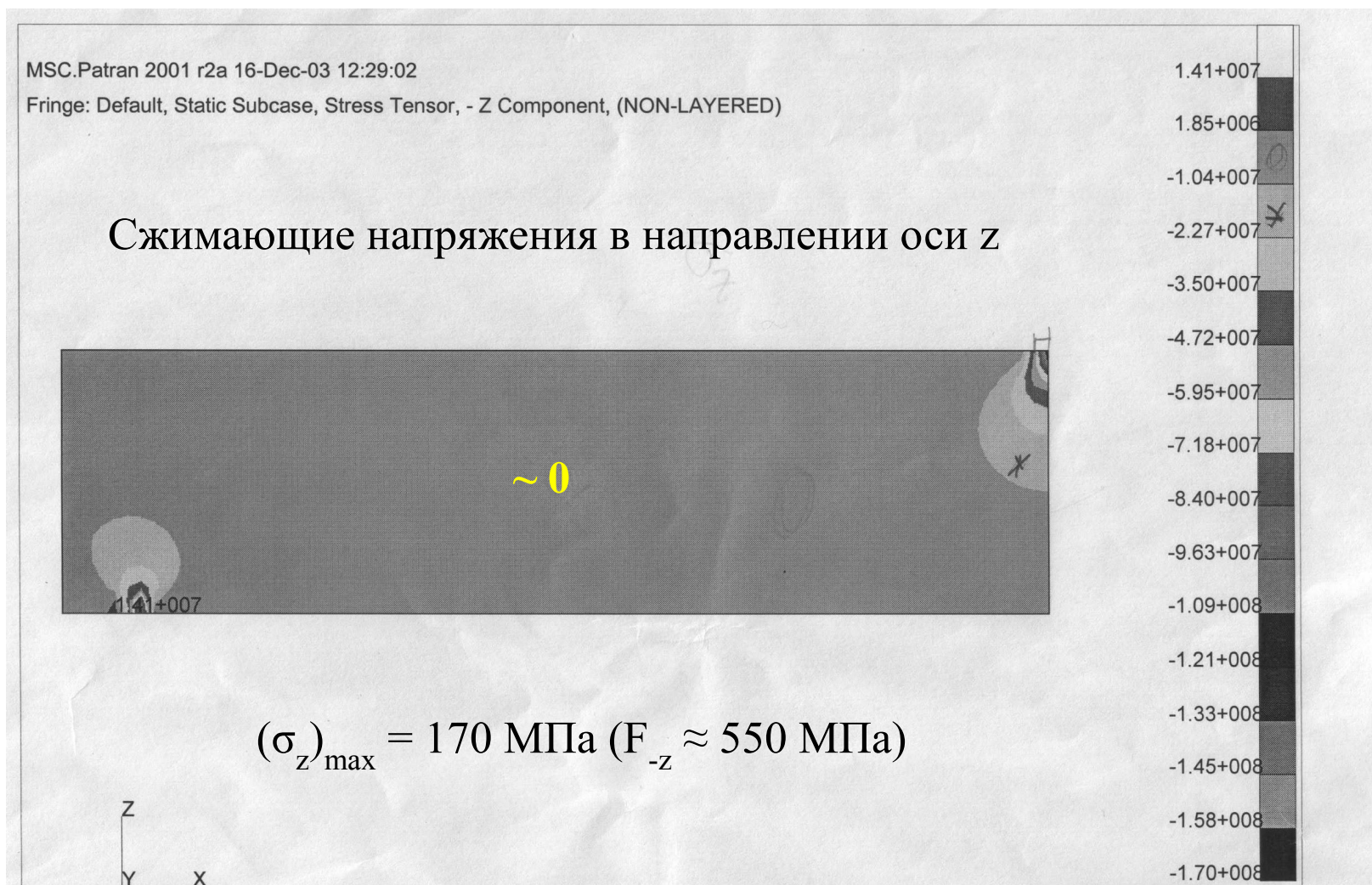
Измерение деформаций с помощью
тензорозетки (2 датчика под углами
 $\pm 45^\circ$ к оси ортотропии).
Характер разрушения – в зоне
максимальных касательных
напряжений.

Расчеты методом конечных элементов (трехмерная модель)

При расчете использовано 25280 элементов, размер элемента 0.5x0.5x0.5 мм.

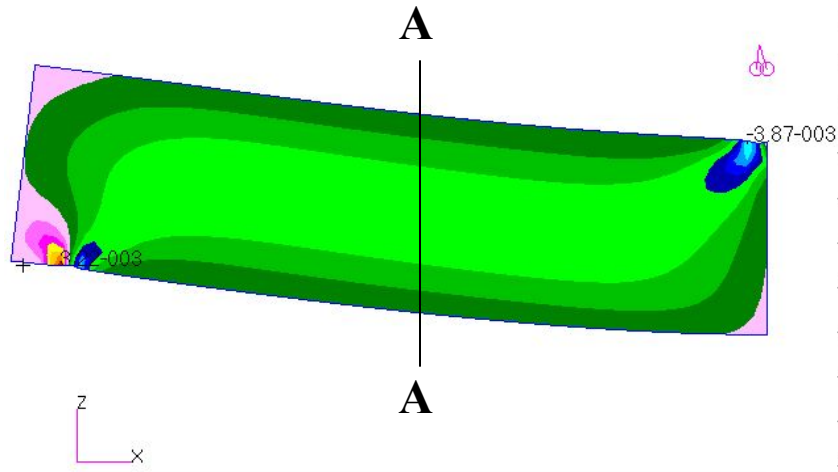
$E_z = 9,6$ ГПа, $E_y = E_x = 60$ ГПа, $G_{xy} = 20$ ГПа, $G_{xz} = G_{yz} = 4,6$ ГПа.

Величина приложенной нагрузки – 10 кН (разрушающая нагрузка ~ 24 кН),
размеры стержня $L = 300$ мм, $H = 40$ мм.

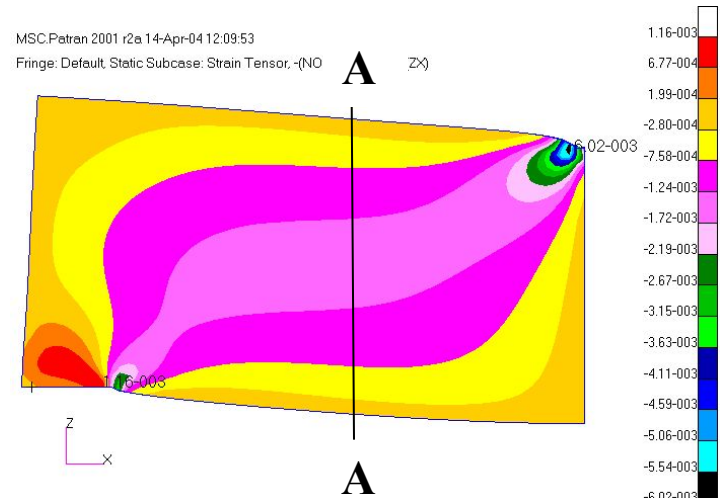


Расчет 1/2 образца в плоскости X0Z

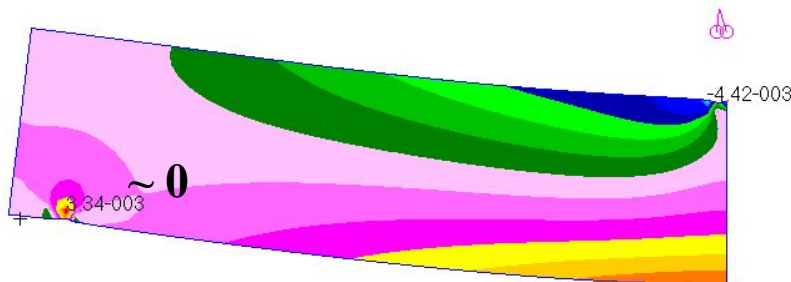
Деформации сдвига ($L = 300$ мм, $H = 40$ мм),
макс. деф. в сечении А-А: $0,127\%$



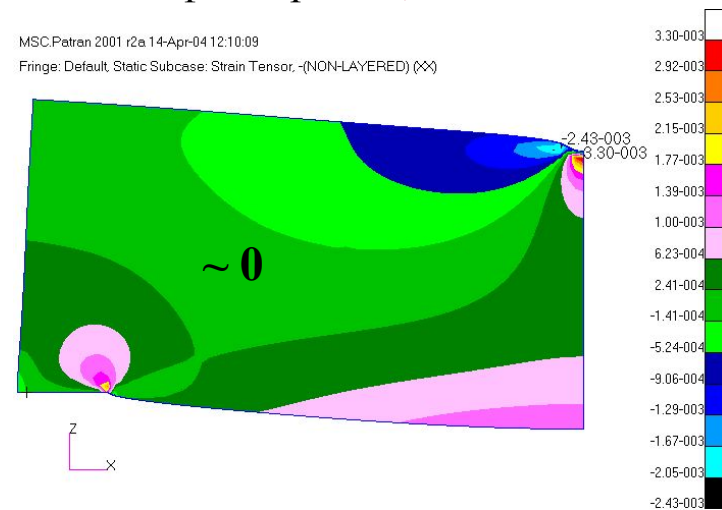
Деформации сдвига ($L = 150$ мм, $H = 40$ мм),
макс. деф. в сечении А-А: $0,148\%$



Изгибные деформации
($L = 300$ мм, $H = 40$ мм),
макс. деф. под опорой $-0,44\%$

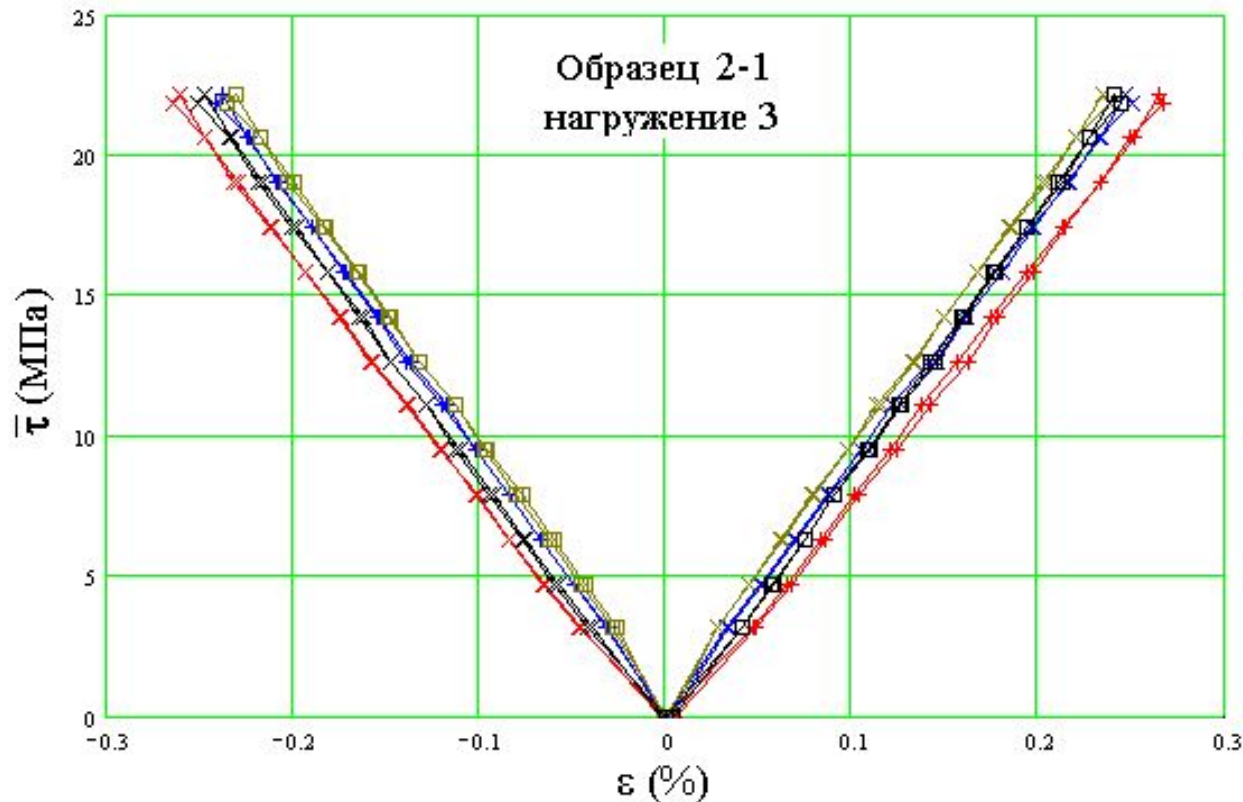


Изгибные деформации
($L = 150$ мм, $H = 40$ мм),
макс. деф. опорой $-0,24\%$



Распределение изгибных деформаций
немного несимметрично относительно
нейтральной плоскости

**Пример диаграмм деформирования (углепластик),
построенных по показаниям датчиков,
расположенных под углами $\pm 45^\circ$ к осям ортотропии образца**



Результаты определения модуля поперечного сдвига по прогибу желательно использовать только для сравнительных оценок этой характеристики при использовании одинаково изготовленных образцов и одинаковых методик испытаний; чем меньше диаметр опор, тем больше концентрация деформаций и напряжений вблизи опор;

для увеличения надежности полученных результатов необходимо испытать стержни с двумя – тремя значениями отношения высоты к длине стержня.

Вопросы для самоконтроля

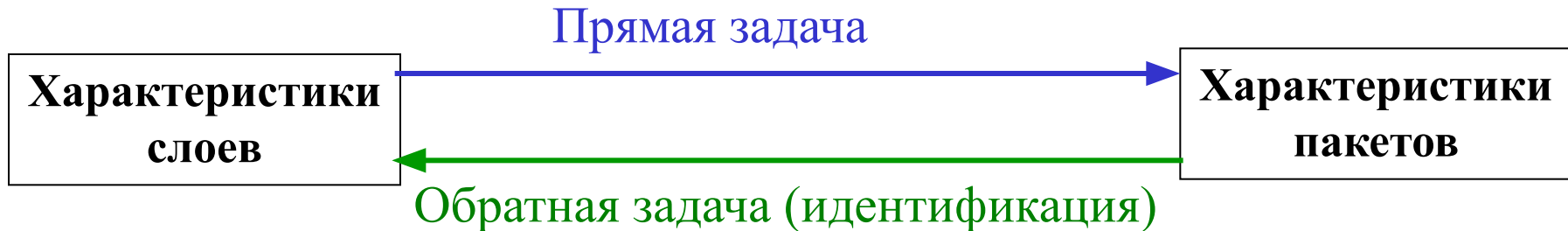
Роль гипотез в инженерном эксперименте

- 1. Каковы основные причины несовпадения данных расчета и эксперимента для какого-либо объекта?**
- 2. Сформулируйте принцип Сен-Венана.**
- 3. От каких характеристик материала зависит область возмущения напряжений в соответствии с принципом Сен-Венана?**

Определение характеристик поперек плоскости армирования

- 1. Каковы основные трудности при определении характеристик упругости и прочности поперек плоскости армирования?**
- 2. Какие образцы можно испытывать, чтобы дать оценку характеристик сдвига поперек плоскости армирования?**
- 3. Какие кинематические гипотезы могут использоваться при оценке испытаний образцов на трехточечный изгиб?**
- 4. Каким должно быть отношение длины к высоте стержня при определении модуля поперечного сдвига по прогибу при испытаниях на трехточечный изгиб?**
- 5. Почему при определении модуля поперечного сдвига по прогибу при трехточечном изгибе желательно испытывать стержни с различным отношением длины к высоте?**
- 6. Как можно определить модуль поперечного сдвига при трехточечном изгибе с помощью тензодатчиков? В чем преимущества этого метода?**
- 7. Сколько тензодатчиков надо приклеить на образце при определении модуля поперечного сдвига при трехточечном изгибе?**

Идентификация характеристик упругости однонаправленного слоя (монослоя) по характеристикам пакетов



Идентификация характеристик слоя – определение таких характеристик слоя, которые обеспечивают наилучшее соответствие экспериментальных и расчетных значений характеристик всех рассматриваемых сложных структур

Особенности рассматриваемых обратных задач:

- математическая формулировка – задача оптимизации;
- неединственность решения (зависит от вида функции цели);
- при идентификации характеристик монослоя – количество заданных характеристик больше, чем количество искомых (переопределенная задача);
- результаты решения задачи идентификации зависят от типа характеристик пакетов, используемых в качестве исходных данных.

Идентификация элементов матрицы жесткости монослоя (плоское напряженное состояние)

$$g_{xx} = \frac{E_x}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}}, \quad g_{yy} = \frac{E_y}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}}, \quad g_{xy} = \frac{E_x\mu_{yx}}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}}, \quad g_{tt} = G_{xy}$$

$$g_{xx} = \sum_{i=1}^N \bar{h}_i \left[c_i^4 g_{11} + s_i^4 g_{22} + 2s_i^2 c_i^2 (g_{12} + 2g_{66}) \right], \quad s_i = \sin \varphi_i, \quad c_i = \cos \varphi_i$$

$$g_{yy} = \sum_{i=1}^N \bar{h}_i \left[s_i^4 g_{11} + c_i^4 g_{22} + 2s_i^2 c_i^2 (g_{12} + 2g_{66}) \right],$$

$$g_{xy} = \sum_{i=1}^N \bar{h}_i \left[(g_{11} + g_{22} - 4g_{66}) s_i^2 c_i^2 + g_{12} (s_i^4 + c_i^4) \right],$$

$$g_{tt} = \sum_{i=1}^N \bar{h}_i \left[(g_{11} + g_{22} - 2g_{12}) s_i^2 c_i^2 + g_{66} (s_i^2 - c_i^2)^2 \right],$$

Прямая задача

$$\{G_{\Sigma}^p\} = [A_0] \{G_0\}$$

$[A_0]$ — прямоугольная матрица $N \times 4$, элементы которой зависят только от схем армирования испытанных образцов

$$\{G_0\} = \{g_{11}, g_{22}, g_{12}, g_{66}\}^T \quad - \text{характеристики монослоя}$$

Базовые характеристики

$$\{G_{\Sigma}^{\varepsilon}\} = \{g_{xx}^{(1)\varepsilon}, g_{yy}^{(1)\varepsilon}, g_{xy}^{(1)\varepsilon}, g_{xx}^{(2)\varepsilon}, g_{yy}^{(2)\varepsilon}, \dots, g_{xx}^{(N)\varepsilon}, g_{yy}^{(N)\varepsilon}\}^T \quad - \text{числа}$$

$$\{G_{\Sigma}^p\} = \{g_{xx}^{(1)p}, g_{yy}^{(1)p}, g_{xy}^{(1)p}, g_{xx}^{(2)p}, g_{yy}^{(2)p}, \dots, g_{xx}^{(N)p}, g_{yy}^{(N)p}\}^T \quad - \text{алгебр. выраж-я}$$

Задача идентификации

$$\text{Функция цели:} \quad \begin{cases} \text{при } \Phi \leq 0 & g_j = 0 \\ \Phi > 0 & \text{при } g_j^{\varepsilon} \neq g_j^p \end{cases} \rightarrow$$

$$\Phi_I = \sum_N (g_j^{\varepsilon} - g_j^p)^2 = \|V_I\|^2$$

$$\Phi_{II} = \sum_N \left(1 - \frac{g_j^p}{g_j^{\varepsilon}}\right)^2 = \|V_{II}\|^2$$

Решение задачи идентификации:

Идентификация абсолютных невязок

$$\{G_{\Sigma}^{\vartheta}\} = [A]\{G_0\}, \text{ размерность } [A] - N \times 4$$

$$[R] = \left([A]^T [A] \right)^{-1} [A]^T$$

$$\{G_0\} = [R]\{G_{\Sigma}^{\vartheta}\}$$

Идентификация относительных невязок

$$\{G_{\Sigma}^{\vartheta}\} = [A]\{G_0\} \longrightarrow \{E\} = [\hat{A}]\{G_0\}$$

$$[\hat{R}] = \left([\hat{A}]^T [\hat{A}] \right)^{-1} [\hat{A}]^T$$

$$\{G_0\} = [\hat{R}]\{E\}, \quad E = \{1, 1, \dots, 1\}^T$$

**Предпочтительный численный метод
вычисления матриц [R] – через сингулярное разложение**

Идентификация технических характеристик упругости монослоя

$$g_{11} = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, \quad g_{22} = \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, \quad g_{12} = \frac{E_1\mu_{21}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, \quad g_{66} = G_{12}$$

Для ортотропного пакета:

$$E_x = g_{xx} - \frac{g_{xy}^2}{g_{yy}}, \quad E_y = g_{yy} - \frac{g_{xy}^2}{g_{xx}}, \quad \mu_{xy} = \frac{g_{xy}}{g_{yy}}, \quad g_{tt} = G_{xy}$$

Прямая задача

$$\{G_0\} = \{g_{11}, g_{22}, g_{12}, g_{66}\}^T$$

$$\{E_\Sigma^p\} = F(\{G_0\}) = \Psi(\{E_0\})$$

$$\{E_0\} = \{E_1, E_2, \mu_{12}, G_{12}\}^T$$

$$\{E_\Sigma\} = \{E_x, E_y, \mu_{xy}, G_{xy}\}^T = \{e_\Sigma^{(1)}, e_\Sigma^{(2)}, e_\Sigma^{(3)}, e_\Sigma^{(4)}\}^T$$

Задача идентификации

$$\Phi_{\Pi} = \sum_N \left(1 - \frac{e_j^p}{e_j^s} \right)^2 = \|W_{\Pi}\|^2 \quad w_{\Pi}^{(j)} = 1 - \frac{\psi_j(\{E_0\})}{e_j^s}$$

$\Phi_{\min}$ → алгоритм нелинейной численной оптимизации,
где элементы $\{E_0\}$ – варьируемые параметры

Устойчивость решения задачи идентификации к случайным отклонениям в исходных данных

$$\{G_{\Sigma}^s\} \rightarrow \{G_0\} \quad \{G_{\Sigma}^s\} + \{\delta G_{\Sigma}^s\} \rightarrow \{G_0\} + \{\Delta G_0\}$$

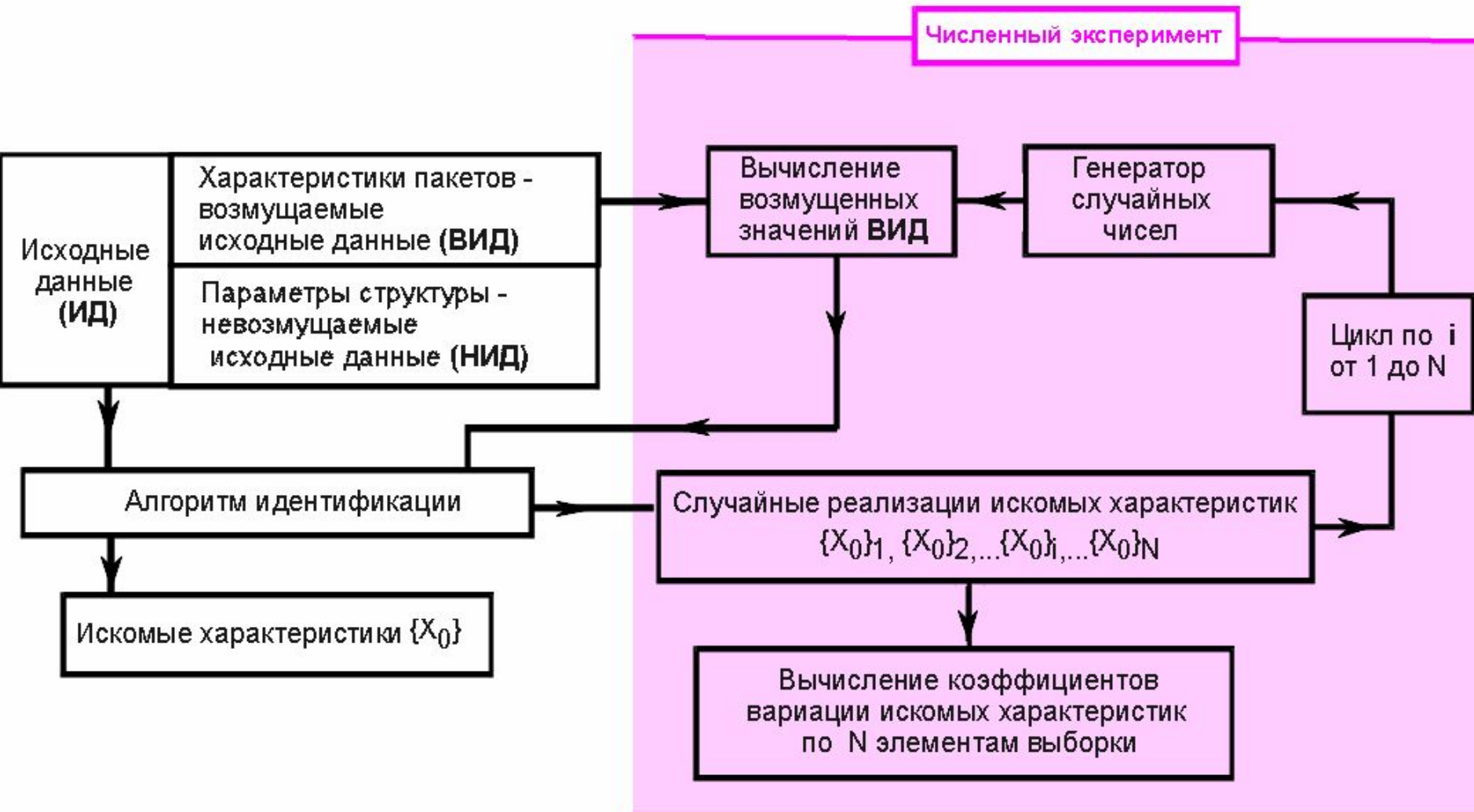
$$\{G_{\Sigma}^s\} \rightarrow \{G_0\} \quad \{G_{\Sigma}^s\} + \{\delta G_{\Sigma}^s\} \rightarrow \{G_0\} + \{\Delta G_0\}$$

$$\{\delta G_{\Sigma}^s\} \ll \{\Delta G_0\} -$$

плохая устойчивость

- 1) Большие погрешности (систематические) экспериментального определения характеристик пакетов (Φ_{Π})
- 2) Недостаточное количество исходных данных (характеристик пакетов)
- 3) Неудачно выбраны схемы армирования пакетов для эксперим. определения характ-к

Численный эксперимент при оценке устойчивости решения задачи идентификации характеристик слоя



Схемы армирования, обеспечивающие наибольшую устойчивость к случайным отклонениям в базовых характеристиках при идентификации характеристик упругости слоя (для каждой структуры должны быть экспериментально определены модуль упругости и коэффициент Пуассона):

0, $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 70^\circ$, 90°

Главные преимущества определения характеристик однонаправленного слоя с использованием идентификации

- 1) Определение таких характеристик слоя, которые наилучшим образом отражают особенности поведения слоя внутри многослойного пакета (отражают технологию формирования пакета с несколькими направлениями укладки волокон).
- 2) Определение всего комплекса характеристик слоя без использования технически сложных испытаний (например, без испытаний плоских образцов на сдвиг).
- 3) Использование всей известной (избыточной) экспериментальной информации о композите для уточнения характеристик слоя.

Примеры решения задач идентификации ЭМЖ

Вар. 1 – минимизация абсолютных невязок (МАН).

Базовые характеристики (углепластик) в гигапаскалях, схемы армирования $\pm\phi$:

$$\mathbf{g}_{xx}(0)=177, \mathbf{g}_{xy}(0)=2,88, \mathbf{g}_{xx}(\pm 20)=138, \mathbf{g}_{xy}(\pm 20)=20, \mathbf{g}_{xx}(\pm 50)=39,1, \mathbf{g}_{xy}(\pm 50)=41,4, \\ \mathbf{g}_{xx}(90)=9,3$$

Обозначим: $c_i = \cos(\phi_i)$, $s_i = \sin(\phi_i)$, i -номер сх. армир.:

$1 \rightarrow \phi=0$; $2 \rightarrow \phi=20$; $4 \rightarrow \phi=50$; $6 \rightarrow \phi=90$,

$$\{G_{\Sigma}^p\} = [A] \{G_0\}$$

$$\{G_0\} = [R] \{G_{\Sigma}^{\circ}\}$$

$$R := (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T$$

$$A := \begin{bmatrix} c1^4 & s1^4 & 2 \cdot (s1^2 \cdot c1^2) & 4 \cdot (s1^2 \cdot c1^2) \\ s1^2 \cdot c1^2 & s1^2 \cdot c1^2 & s1^4 + c1^4 & -4 \cdot (s1^2 \cdot c1^2) \\ c2^4 & s2^4 & 2 \cdot (s2^2 \cdot c2^2) & 4 \cdot (s2^2 \cdot c2^2) \\ s2^2 \cdot c2^2 & s2^2 \cdot c2^2 & s2^4 + c2^4 & -4 \cdot (s2^2 \cdot c2^2) \\ c4^4 & s4^4 & 2 \cdot (s4^2 \cdot c4^2) & 4 \cdot (s4^2 \cdot c4^2) \\ s4^2 \cdot c4^2 & s4^2 \cdot c4^2 & s4^4 + c4^4 & -4 \cdot (s4^2 \cdot c4^2) \\ c6^4 & s6^4 & 2 \cdot (s6^2 \cdot c6^2) & 4 \cdot (s6^2 \cdot c6^2) \end{bmatrix}$$

$$G_{xy} = \{G_{\Sigma}^p\}$$

$$G_{xy} := \begin{pmatrix} 177 \\ 2.88 \\ 138 \\ 20.0 \\ 39.1 \\ 41.4 \\ 9.3 \end{pmatrix}$$

$$G_0 := \begin{pmatrix} g11 \\ g22 \\ g12 \\ g66 \end{pmatrix}$$

Вар. 2 – минимизация относительных невязок (МОН).

Базовые характеристики (углепластик) в гигапаскалях:

$g_{xx}(0)=177, g_{xy}(0)=2,88, g_{xx}(20)=138, g_{xy}(20)=20, g_{xx}(50)=39,1, g_{xy}(50)=41,4, g_{xx}(90)=9,3$

Обозначим: $ci = \cos(\phi_i), si = \sin(\phi_i)$

$$\hat{a}_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{g_i^3} \quad [\hat{R}] = \left([\hat{A}]^T [\hat{A}] \right)^{-1} [\hat{A}]^T$$

$$\{G_0\} = [\hat{R}] \{E\}, \quad E = \{1,1,...1\}^T$$

$$v_j = \frac{g_j^3 - g_j^p}{g_j^3} 100\% \quad k_v - \text{коэфф. вариации в числ. эксп-те (\%)} \\ \text{по 10 расчетам}$$

Вариант 1 (МАН)

$$G_0 := \begin{pmatrix} 175.739 \\ 9.277 \\ 2.781 \\ 4.417 \end{pmatrix} \quad v = \begin{pmatrix} 0.712 \\ 3.453 \\ -1.127 \\ 2.54 \\ 0.694 \\ -1.467 \\ 0.243 \end{pmatrix}$$

Вариант 2 (МОН)

$$G_0 := \begin{pmatrix} 175.864 \\ 9.304 \\ 2.886 \\ 4.453 \end{pmatrix} \quad v := \begin{pmatrix} 0.642 \\ -0.194 \\ -1.224 \\ 2.118 \\ 0.398 \\ -1.603 \\ -0.046 \end{pmatrix}$$

$$k_v = [1,7 \quad 2,6 \quad 2,9 \quad 10,5]$$

Вывод: при удачно выбранных базовых характеристиках различия между минимизацией относительн. и абсолютн. невязок невелики, хотя для существенно анизотропных материалов предпочтительна минимизация относительных невязок

Вар. 3 – минимизация абсолютных невязок.

Базовые характеристики (углепластик) в гигапаскалях:

$g_{xx}(0)=177, g_{xy}(0)=2,88, g_{xx}(20)=138, g_{xx}(40)=65,6, g_{xy}(40)=40,7, g_{xx}(70)=12,2, g_{xy}(70)=17,5;$

$$\{G_{\Sigma}^p\} = [A]\{G_0\}$$

$$\{G_0\} = [R]\{G_{\Sigma}^{\text{э}}\}$$

$$R := \left(A^T \cdot A\right)^{-1} \cdot A^T$$

$$A := \begin{bmatrix} c1^4 & s1^4 & 2 \cdot (s1^2 \cdot c1^2) & 4 \cdot (s1^2 \cdot c1^2) \\ s1^2 \cdot c1^2 & s1^2 \cdot c1^2 & s1^4 + c1^4 & -4 \cdot (s1^2 \cdot c1^2) \\ c2^4 & s2^4 & 2 \cdot (s2^2 \cdot c2^2) & 4 \cdot (s2^2 \cdot c2^2) \\ c3^4 & s3^4 & 2 \cdot (s3^2 \cdot c3^2) & 4 \cdot (s3^2 \cdot c3^2) \\ s3^2 \cdot c3^2 & s3^2 \cdot c3^2 & s3^4 + c3^4 & -4 \cdot (s3^2 \cdot c3^2) \\ s5^2 \cdot c5^2 & s5^2 \cdot c5^2 & s5^4 + c5^4 & -4 \cdot (s5^2 \cdot c5^2) \\ c5^4 & s5^4 & 2 \cdot (s5^2 \cdot c5^2) & 4 \cdot (s5^2 \cdot c5^2) \end{bmatrix}$$

$$G_{xy} := \begin{pmatrix} 177 \\ 2.88 \\ 138 \\ 65.6 \\ 40.7 \\ 12.2 \\ 17.5 \end{pmatrix}$$

$$G_0 := \begin{pmatrix} g11 \\ g22 \\ g12 \\ g66 \end{pmatrix}$$

$$v_j = \frac{g_j^{\text{э}} - g_j^p}{g_j^{\text{э}}} 100\%$$

Вар. 4 – минимизация относительных невязок.

Базовые характеристики (углепластик) в гигапаскалях:

$g_{xx}(0)=177, g_{xy}(0)=2,88, g_{xx}(20)=138, g_{xx}(40)=65,6, g_{xy}(40)=40,7, g_{xx}(70)=12,2, g_{xy}(70)=17,5;$

$$\hat{a}_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{g_i^{\vartheta}} \quad [\hat{R}] = \left([\hat{A}]^T [\hat{A}] \right)^{-1} [\hat{A}]^T$$

$$\{G_0\} = [\hat{R}] \{E\}, \quad E = \{1,1,...1\}^T$$

$$v_j = \frac{g_j^{\vartheta} - g_j^p}{g_j^{\vartheta}} 100\% \quad k_v - \text{коэфф. вариации в числ. эксп-те (\%)} \\ \text{по 10 расчетам}$$

Вывод: при неудачно выбранных базовых характеристиках различия между минимизацией относительных и абсолютных невязок велики и результат может быть грубо ошибочным (отрицательные значения характеристик жесткости)

Вариант 3 (МАН)

$$G_0 := \begin{pmatrix} 175.341 \\ 15.753 \\ -1.358 \\ 5.174 \end{pmatrix} \quad v = \begin{pmatrix} 0.937 \\ 147.165 \\ -0.573 \\ -2.789 \\ 0.209 \\ -35.437 \\ 1.458 \end{pmatrix}$$
$$k_v = [3,3 \quad 27,1 \quad 102 \quad 35,5]$$

Вариант 4 (МОН)

$$G_0 := \begin{pmatrix} 168.885 \\ -7.944 \\ 2.801 \\ 10.417 \end{pmatrix} \quad v = \begin{pmatrix} 4.584 \\ 2.736 \\ 1.117 \\ -4.059 \\ 25.399 \\ -19.204 \\ 1.458 \end{pmatrix}$$
$$k_v = [4,9 \quad 137 \quad 82 \quad 25,8]$$

Вопросы для самоконтроля

Идентификация характеристик упругости

- 1. Какая задача является прямой, а какая обратной при определении характеристик упругости многослойного пакета?**
- 2. Какие величины являются исходными данными при идентификации характеристик упругости слоя многослойного пакета?**
- 3. Как формируется функция цели при решении задачи идентификации характеристик упругости слоя?**
- 4. Что такое – абсолютные невязки характеристик пакетов и что такое относительные невязки характеристик пакетов?**
- 5. Для каких материалов минимизация относительных невязок при определении элементов матриц жесткости предпочтительна и почему?**
- 6. Чем отличается идентификация элементов матрицы жесткости слоя от идентификации технических постоянных слоя?**
- 7. Какая матрица называется сингулярной?**
- 8. Почему важно знать устойчивость решения задачи идентификации к случайным отклонениям в исходных данных?**
- 9. Сравнение каких величин в численном эксперименте позволяет судить о хорошей или плохой устойчивости решения задачи идентификации к случайным отклонениям в исходных данных?**
- 10. Что надо сделать, если устойчивость определения какой-то характеристики слоя к случайным отклонениям в исходных данных плохая?**
- 11. Каковы главные преимущества определения характеристик слоя с использованием метода идентификации?**

Задания для самостоятельного решения задачи идентификации

ЭМЖ (ГПа), вар. 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 – мин. абс. невязок,

ОСТАЛЬН – мин. ОТН. НЕВЯЗОК

Вар. 1, 2:

$g_{xx}(0)=177$, $g_{xy}(0)=2,88$, $g_{xx}(20)=138$, $g_{xy}(20)=20$, $g_{xx}(50)=39,1$, $g_{xy}(50)=41,4$, $g_{xx}(90)=9,3$;

Вар. 3, 4:

$g_{xx}(0)=175$, $g_{xy}(0)=2,78$, $g_{xx}(20)=135$, $g_{xx}(40)=65,6$, $g_{xy}(40)=40,7$, $g_{xx}(70)=12,2$, $g_{xy}(70)=17,5$;

Вар. 5, 6:

$g_{xx}(0)=177$, $g_{xy}(0)=2,88$, $g_{xx}(20)=138$, $g_{xy}(20)=20$, $g_{xx}(40)=65,6$, $g_{xy}(40)=40,7$, $g_{xx}(90)=9,3$;

Вар. 7, 8:

$g_{xx}(0)=175$, $g_{xy}(0)=2,78$, $g_{xx}(20)=135$, $g_{xx}(50)=38,1$, $g_{xy}(50)=41,4$, $g_{xx}(90)=9,3$;

Вар. 9, 10:

$g_{xx}(0)=177$, $g_{xx}(20)=138$, $g_{xy}(20)=20$, $g_{xx}(50)=39,1$, $g_{xy}(50)=41,4$, $g_{xx}(70)=12,2$;

Вар. 11, 12:

$g_{xx}(20)=138$, $g_{xy}(20)=20$, $g_{xx}(50)=39,1$, $g_{xy}(50)=41,4$, $g_{xx}(40)=65,6$, $g_{xx}(70)=12,2$, $g_{xy}(70)=17,5$;

Вар. 13, 14:

$g_{xx}(20)=138$, $g_{xy}(20)=20$, $g_{xx}(40)=65,6$, $g_{xy}(40)=40,7$, $g_{xx}(70)=12,2$, $g_{xy}(70)=17,5$, $g_{xx}(90)=9,3$;

Вар. 15, 16:

$g_{xx}(0)=175$, $g_{xx}(20)=135$, $g_{xy}(20)=20$, $g_{xx}(40)=65,6$, $g_{xx}(50)=38,1$, $g_{xx}(70)=12,2$, $g_{xy}(70)=17,5$;

Задания для самостоятельного решения задачи идентификации
ЭМЖ (ГПа), вар. 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 – мин. абс. невязок,
остальн – мин. отн. невязок

Вар. 17, 18:

$$g_{xx}(0)=175, g_{xy}(0)=2,88, g_{xx}(20)=135, g_{xx}(40)=65,6, g_{xx}(70)=12,2, g_{xq}(90)=9,3,;$$

Вар. 19, 20:

$$g_{xx}(0)=175, g_{xx}(20)=135, g_{xy}(20)=20, g_{xx}(40)=65,6, g_{xx}(50)=38,1, g_{xq}(90)=9,3,;$$