

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 25.02.2022 14:27:47
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb573e943df9a4851fd56d989

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра промышленного и гражданского строительства

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
«10» 02 2022


**Испытание элементов, соединений и конструкций
из древесины и пластмасс**

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Конструкции из дерева и пластмасс»
для студентов, обучающихся по направлению
08.03.01 «Строительство»

Курск 2022

УДК 69

Составители: А.А. Сморчков, К.О. Дубракова, А.В. Масалов

Рецензент

Кандидат экономических наук, доцент Шлеенко А.В.

Испытание элементов, соединений и конструкций из древесины и пластмасс: методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.А. Сморчков, К.О. Дубракова, А.В. Масалов.- Курск, 2022. - 45 с. - Библиогр.: с. 46.

В методических указаниях изложены теоретические основы и методика проведения работ по испытанию материалов, соединений и конструкций из древесины и материалов на ее основе.

Методические указания соответствуют федеральному государственному образовательному стандарту по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.
Усл.Печ.Лист 2,67. Уч.-изд. л. 2,42. Тираж 100 экз. Заказ 854. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа №1	5
Определение расчётного сопротивления древесины при статическом изгибе..	
Лабораторная работа №2	9
Определение модуля деформации композиционного материала при изгибе....	
Лабораторная работа №3	13
Ползучесть и длительная прочность древесины при изгибе	
Лабораторная работа №4	18
Исследование работы нагельного соединения древесины.....	
Лабораторная работа №5	24
Исследование работы деревянной балки составного сечения на дискретных связях	24
Лабораторная работа №6	29
Исследование НДС клееной деревянной балки при изгибе	29
Лабораторная работа №7	37
Исследование работы комбинированной конструкции.....	
Заключение.....	45
Библиографический список.....	46

Введение

Дисциплина «Конструкции из дерева и пластмасс» (КДП) относится к циклу специальных дисциплин. Дисциплина КДП является базовой для бакалавров, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство». Лабораторные работы являются составным элементом теоретической части дисциплины «Конструкции из дерева и пластмасс».

Тематически лабораторные работы раскрывают основную сущность древесины, ее соединений и конструкций на ее основе как анизотропного материала. Выявляют зависимость прочностных свойств от длительного приложения действующего усилия, влияние на характер распределения напряжений в объеме материала конструкции анизотропии механических свойств.

Лабораторные работы №1 и №2 посвящены исследованию прочностных и деформационных свойств древесины. Подобный подход может быть распространен и на изучение аналогичных свойств других полимерных материалов.

Реономные свойства материала изучаются на основе лабораторной работы №3. в ней отражен авторский подход на видение этого процесса и методику оценки коэффициента длительного сопротивления.

Соединения в деревянных конструкциях используются в следующих случаях: при соединении элементов в узлах (лабораторная работа №4), а также в конструкциях (лабораторная работа №5) при увеличении высоты их сечения.

Основным свойством таких соединений является податливость, что приводит к снижению несущей способности и увеличению деформативности. Оценить податливость и установить несущую способность соединений и элементов является целью этих работ.

Действительная работа конструкций отличается от идеализированных моделей, на основе которых приняты расчетные формулы, используемые в проектировании. Какова действительная работа конструкций? Эти вопросы исследованы в лабораторных работах №6 и №7.

Приведенный цикл лабораторных работ ставит своей целью научить студента планировать, проводить и обрабатывать экспериментальные результаты, а также глубже на основе практических знаний изучить свойства древесины, соединений и конструкций.

Лабораторная работа №1

Определение расчётного сопротивления древесины при статическом изгибе

1.1 Цель работы:

Оценка расчётного сопротивления древесины при статическом изгибе.

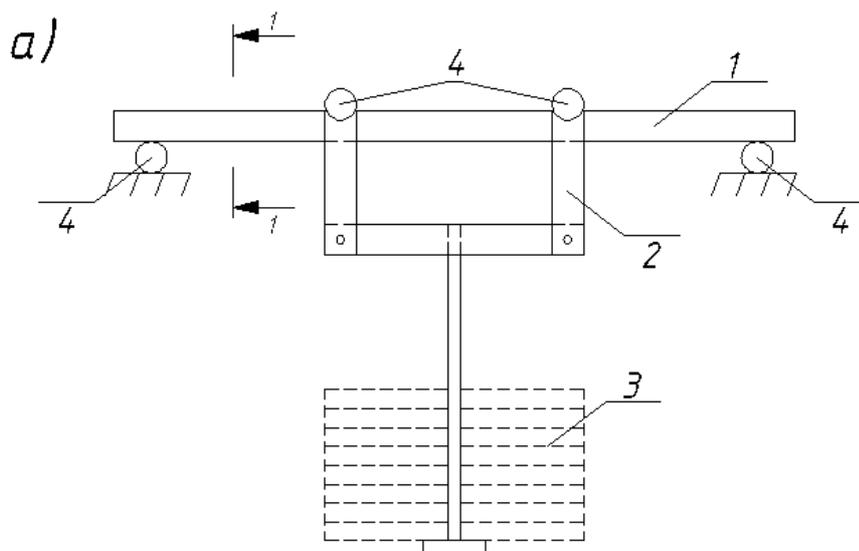
1.2. Описание работы:

Расчёт конструкций из цельной и клееной древесины по первой группе предельных состояний заключается в сопоставлении действующих от расчётных нагрузок напряжений с расчётным сопротивлением древесины в зависимости от характера работы элемента: изгиб, растяжение, сжатие и т.п.

При этом в зависимости от характера работы элемента различают прочность при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге, смятии поперек волокон. Для каждого вида сопротивления определяют размеры образцов и схемы приложения нагрузок.

При определении расчётного сопротивления древесины при изгибе используются «чистые» (т.е. без природных пороков, к которым относятся сучки, косослой, смоляные «кармашки» и т.д.) прямослойные образцы в виде балочек прямоугольного поперечного сечения.

Испытания при изгибе производится по балочной схеме (см. рис. 1.1) с приложением нагрузки в третях расчётного пролёта. Разделение нагрузки на две составляющие производится с помощью траверсы. Нагрузка на балочку передаётся через металлические валики с радиусом кривизны в 15 мм.



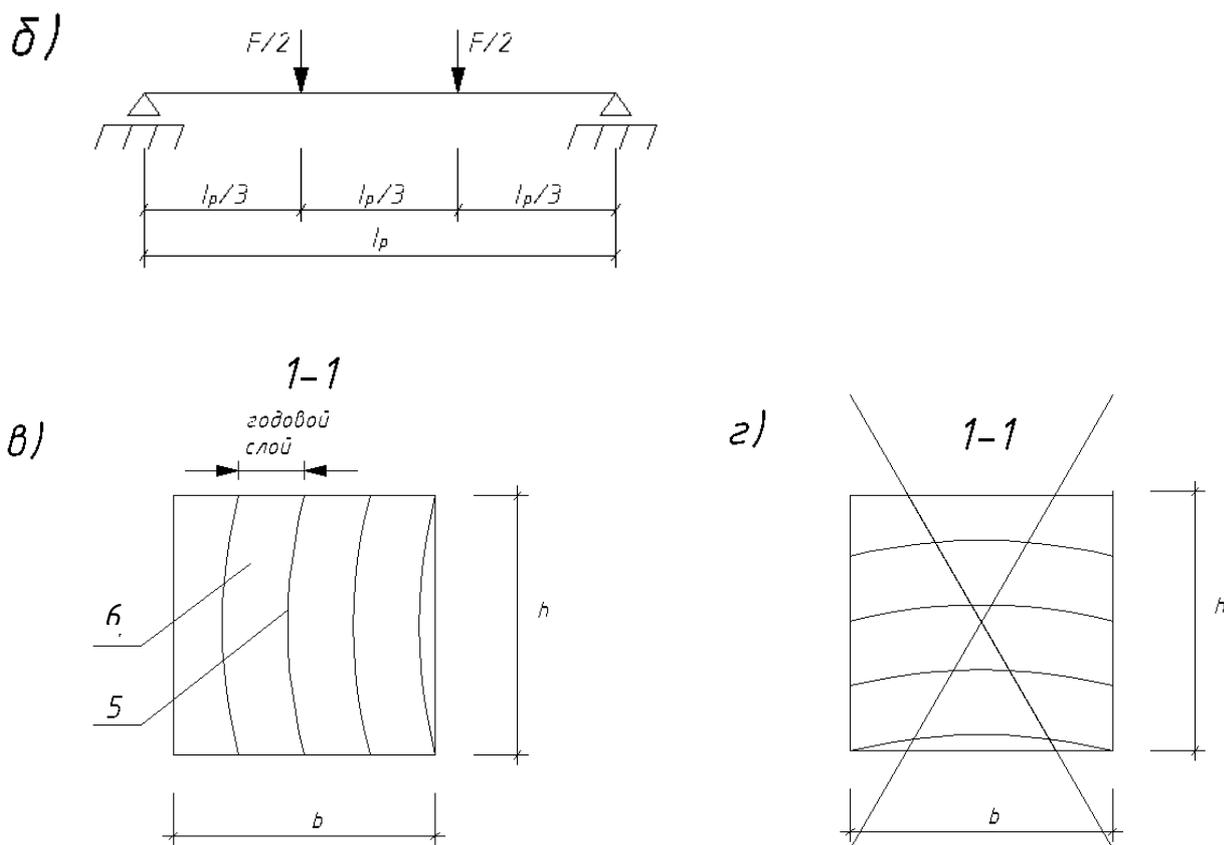


Рис.1.1. Схема испытания балочек на изгиб:

а) общий вид; б) расчётная схема; в) правильное расположение годовых слоёв в сечении; г) то же – неправильное.

1 – образец для испытаний; 2 – траверса; 3 – грузы;

4 – опоры; 5 – «поздняя» древесина; 6 – «ранняя» древесина.

Количество годовых слоёв в сечении должно быть не менее 5 и не более 15. При этом под годовым слоем подразумевается слой, состоящий из «ранней» и «поздней» древесины. Принятое расположение годовых слоёв (см. рис. 1.1, в) исключает возможность разрушения по более «слабой» в механическом отношении «ранней» древесины от сдвига в плоскости.

Испытание производится путём последовательного нагружения штучными грузами (около 10% от разрушающей нагрузки) или в прессе со скоростью $(1,50 \pm 0,30)$ кН/мин. Полученная в этом случае прочность называется кратковременной. Древесина относится к реономным материалам (т.е. к материалам, у которых свойства зависят от длительности нагружения). Прочность древесины при изгибе зависит от следующих факторов:

- длительности нагружения;
- влажности древесины;
- от угла приложения нагрузки по отношению к направлению волокон в образце и наличия сучков.

При назначении расчётного сопротивления древесины количество и размер сучков, а так же наклон волокон нормируется. Длительность нагру-

жения учитывается путём введения коэффициента, который называется коэффициентом длительного сопротивления – $m_{дл} = R_{дл}/R_{вр}$ (здесь $R_{дл}$ – длительная прочность; $R_{вр}$ – кратковременная прочность).

По СНиП II – 25 – 80. «Деревянные конструкции. Нормы проектирования», коэффициент $m_{дл}$ принят равным 0,66 независимо от сорта древесины и характера работы элемента (изгиб, растяжение, сжатие и т.д.), что не всегда правильно отражает результаты экспериментальных исследований.

По результатам исследований, проведенным ранее в Курск ГТУ (ныне ЮЗГУ) коэффициент $m_{дл}$ для древесины I сорта равен 0,64, II сорта – 0,546, III сорта – 0,427, что необходимо учитывать при назначении расчётного сопротивления древесины.

1.3. Проведение экспериментов:

Для определения расчётного сопротивления древесины отбирают 3-5 образцов одинаковых по расположению и количеству годовых слоёв. Измеряют сечение элементов штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, а так же влажность образцов. Разность измеренной влажности элементов не должна превышать 2%. Результаты измерений заносят в таблицу журнала испытаний.

В зависимости от испытательного оборудования производят нагружения образцов, в соответствии со схемой на рис 1.1,б, и определяют разрушающую нагрузку – F_p . Результатом разрушения считают разделения образца на части. Результаты испытаний заносят в таблицу журнала.

Временные сопротивления (кратковременную прочность) определяют для каждого образца по формуле:

$$R_{врi} = \frac{F_{pi} \cdot l_p}{b_i \cdot h_i^2}, \quad (1.1)$$

где l_p – расчётный пролёт; F_{pi} – разрушающая нагрузка; b_i и h_i – соответственно ширина и высота сечения образца.

В методе расчёта по предельным состояниям первой группы расчётное сопротивление – R определяется через нормативное сопротивление – R^H по формуле:

$$R = (R^H/\gamma_m) \cdot m_{дл}, \quad (1.2)$$

где γ_m – коэффициент надёжности по материалу.

В методе предельных состояний все величины прочности определяют с заданной вероятностью – P . Для нормативного сопротивления эта величина равна $P = 95\%$ (т.е. вероятность разрушения составляет 95%) (см. рис.1).

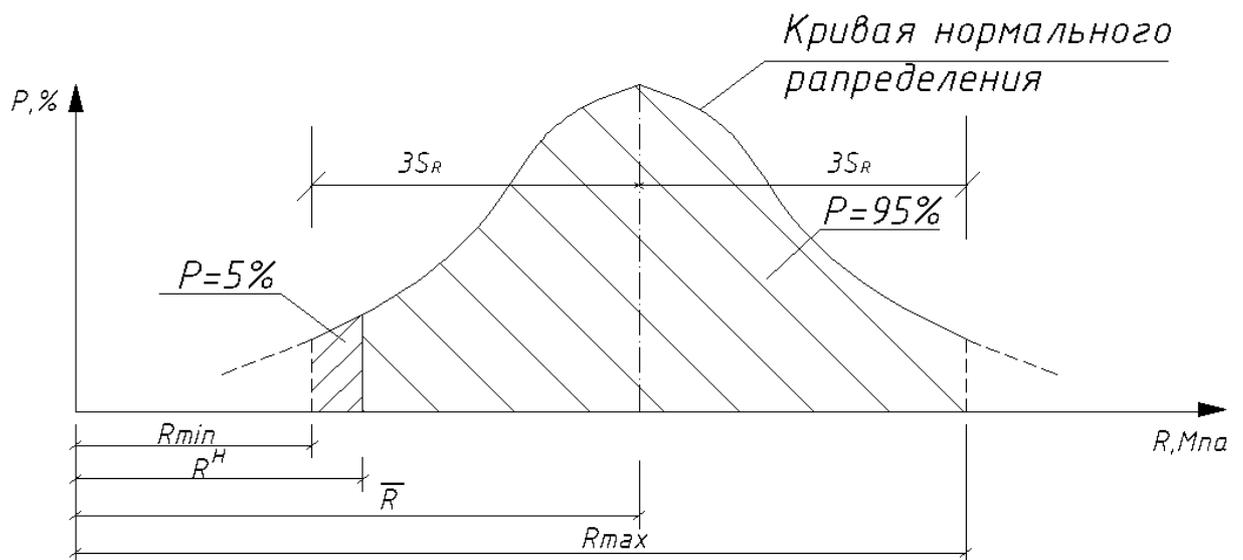


Рис.1.2. Кривая нормального распределения

Для большинства механических испытаний закон распределения величины прочности подчиняется нормальному закону (закон Гауса-Лапласа).

По этому нормативную прочность с вероятностью разрушения $P = 95\%$ можно определить по формуле:

$$R^H = \bar{R} \cdot (1 - \gamma_R \cdot t_{\alpha, \nu}), \quad (1.3)$$

где $\bar{R} = \frac{\sum R_i}{n}$ – среднее значение прочности по результатам «n» испытаний; $\gamma_R = \left(\frac{S_R}{\bar{R}} \right)$ – коэффициент вариации (здесь

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum (\bar{R} - R_i)^2}{n - 1}} \text{ – среднее квадратичное отклонение);}$$

$t_{\alpha, \nu}$ – коэффициент Стьюдента (Стьюдент – псевдоним английского математика Госсета) для $\alpha = 1 - P$ и $\nu = n - 1$.

Коэффициент γ_m определяется по формуле:

$$\gamma_m = \frac{1 - \gamma_R \cdot t_{\alpha, \nu}}{1 - \gamma_R \cdot t_{\alpha_1, \nu}}, \quad (1.4)$$

где $t_{\alpha_1, \nu}$ – коэффициент Стьюдента для $\alpha_1 = 0,01$ (для $P = 99\%$) и $\nu = n - 1$.

Коэффициенты $t_{\alpha, \nu}$ и $t_{\alpha_1, \nu}$ определяются по математическим таблицам.

По результатам испытаний производится сравнение полученных результатов с табличным значением и выводы.

Контрольные вопросы.

1. Как различается прочность элемента в зависимости от характера его работы?
2. Назовите основные факторы, от которых зависит прочность древесины при изгибе.
3. Методами строительной механики выведите формулу для определения кратковременной прочности (1.1).
4. Постройте эпюры внутренних усилий для испытываемой балочки. (Расчетная схема представлена на рис. 1.1б). Прокомментируйте особенности данной схемы при определении расчетного сопротивления древесины на статический изгиб.

Лабораторная работа №2

Определение модуля деформации композиционного материала при изгибе

2.1 Цель работы:

Определить модуль деформации композиционного материала при статическом изгибе.

2.2. Описание работы:

Расчет конструкции по второй группе предельных состояний требует знание величины модуля упругости (модуля деформаций) материала. Величину модуля упругости можно определить при сжатии и при изгибе.

Измеряемые при испытаниях на изгиб, прогибы и деформации связаны с деформационными характеристиками материала конструкции (модулями упругости и сдвига – E_x и G_{xy}) аналитическими зависимостями, точность которых определяется лежащими в их основе гипотезами. Техническая теория изгиба, излагаемая в курсах сопротивления материалов, может привести к грубым ошибкам в толковании результатов экспериментов балок из анизотропного материала, которым является древесина.

Модуль упругости древесины, можно определить по величине прогиба от нагрузки при испытаниях на изгиб при схеме нагружения с двумя сосредоточенными нагрузками в пролете. К преимуществам такого метода можно отнести близкое к однородному напряженное состояние на участке между сосредоточенными силами. Деформации сдвига, возникающие на участке действия перерезывающей силы, увеличивают прогиб конструкции, что приводит к погрешности при определении величины модуля упругости. Влияние деформаций сдвига можно исключить, измеряя прогиб только на участке между сосредоточенными силами

В общем случае нагружения изгибаемого элемента двумя сосредоточенными нагрузками максимальный прогиб можно определить, используя зависимость:

$$f = f^*(1+S), \quad (2.1)$$

где f^* – прогиб без учета сдвигов; S – функция, учитывающая влияние сдвигов на прогиб конструкции.

Прогиб f^* определяется по правилам строительной механики, что допускается, учитывая линейную работу материала конструкции вплоть до разрушения.

Функцию S учитывающую влияние сдвигов, можно определить по методу Мора, построенного на принципе виртуальной работы. Её величина равна:

$$S = \mu_0 \frac{k}{8} \cdot \frac{E_x}{G_{xy}} \cdot \frac{h^2}{l^2}, \quad (2.2)$$

где k – коэффициент, учитывающий схему приложения нагрузок; μ_0 – коэффициент формы сечения (для прямоугольного сечения $\mu_0=1,2$).

При нагружении балки в двух точках прогиб с учетом влияния сдвига определяется:

– в середине пролёта:

$$f_c = \frac{F \cdot a(3l^2 - 4a^2)}{48E_x J} \left[1 + 2,4 \frac{E_x h^2}{G_{xy}(3l^2 - 4a^2)} \right]; \quad (2.3)$$

– в месте приложения нагрузки

$$f_M = \frac{Fa^2(3l - 4a)}{12E_x J} \left[1 + 0,6 \frac{E_x h^2}{G_{xy}(3la - 4a^2)} \right]. \quad (2.4)$$

Поправка от сдвигов зависит от отношения модулей упругости и сдвига (E_x/G_{xy}), геометрических параметров конструкции l/h , схем приложения нагрузки – a/l . В то же время разность прогибов:

$$f_c - f_M = \frac{F \cdot a}{16E_x J} (1 - 2a)^2, \quad (2.5)$$

не зависит от сдвигов, так как участок балки между точками приложения нагрузок изгибается только от нормальных напряжений (если пренебречь краевым эффектом вблизи точек приложения нагрузок). Эта особенность напряженного состояния была учтена и нашла отражение в определении величины модуля упругости древесины при изгибе:

$$E_x = \frac{F \cdot a(1 - 2a)^2}{16J(f - f_M)}. \quad (2.6)$$

Полученная формула (2.6) позволяет оценить модуль упругости материала конструкции при двухточечной схеме приложения нагрузки, исключая при этом влияние модуля сдвига на конечный результат. Формула примени-

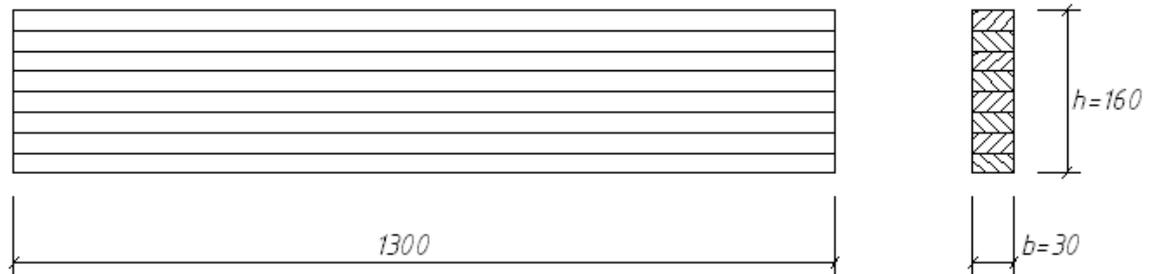
ма при испытании трёхслойных плит с различными обшивками (металл, фанера, пластик) и среднем слоем (пенопласт, минвата и т.п.). Необходимым условием является цена деления приборов: чем меньше цена деления, тем точнее определим модуль упругости материала конструкции.

2.3. Проведение экспериментов

Для оценки модуля упругости используем балку из анизотропного материала (клееная древесина).

Размеры балки и схема приложения нагрузки приведены на рис.2.1.

а)



б)

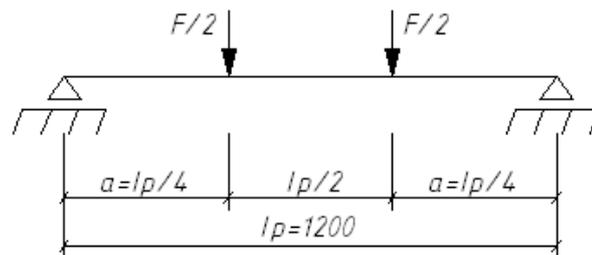


Рис. 2.1. Конструкция балки (а) и расчетная схема (б) её испытания.

Нагрузку прикладываем в четвертях пролета равного $l_p = 1200$ мм. Величину нагрузки определяем из следующих вычислений:

$$\frac{M}{W} = R_U; \quad (2.7)$$

$$\frac{6 \cdot F \cdot l_p}{8 \cdot (b \cdot h^2)} = R_U; \quad (2.7a)$$

$$F = \frac{4 \cdot b \cdot h^2 \cdot R_U}{3 \cdot l_p}. \quad (2.8)$$

Принимая $R_U = 14$ МПа, получим:

$$F = (4 \cdot 3 \cdot 16^2 \cdot 14) / (3 \cdot 120) = 1195 \text{ кг.}$$

Назначаем величину испытательной нагрузки

$$F_{\text{исп}} = F / \gamma_m = 1200 / 1,2 = 1000 \text{ кг.}$$

Для измерения прогибов используем индикаторы часового типа, которые крепятся в специальном индикаторном приспособлении (рис.2.2).

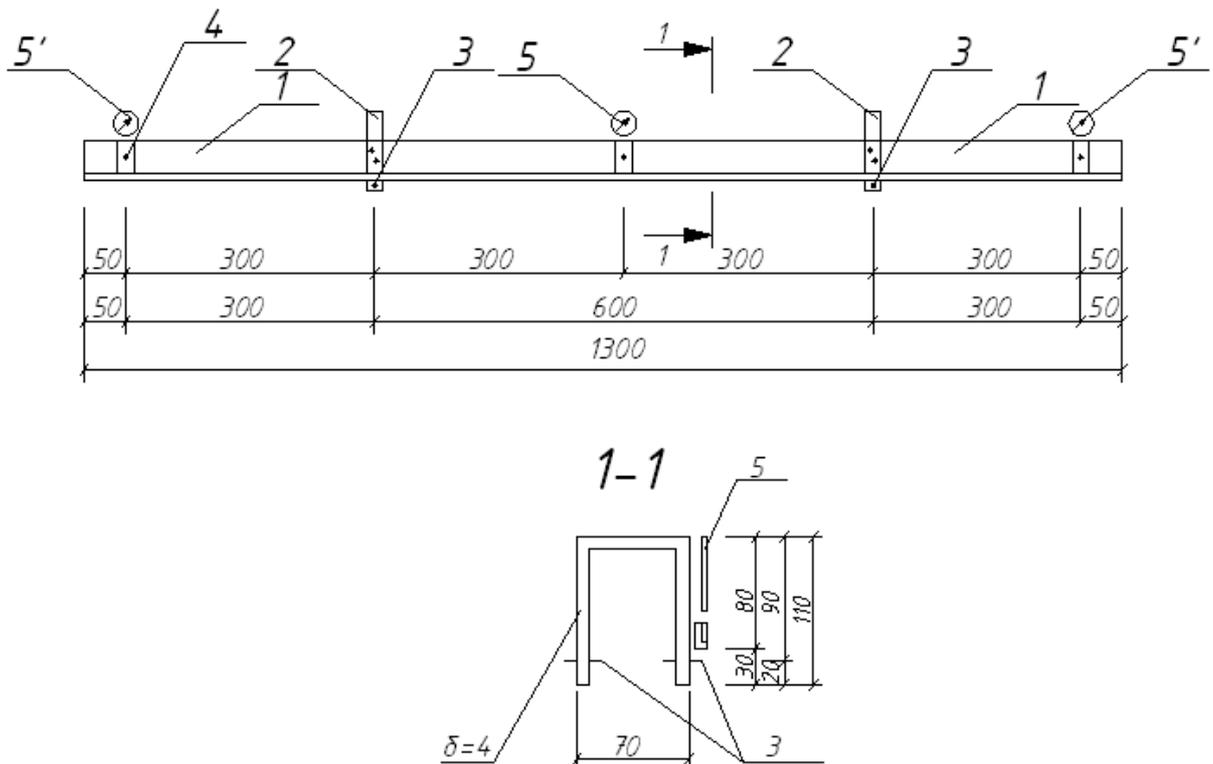


Рис. 2.2. Приспособление для крепления индикаторов

1 - металлический уголок; 2 - П-образные хомуты; 3 - болты с игольчатыми наконечниками; 4 - призмы для крепления индикаторов; 5 и 5' - индикаторы часового типа.

Индикаторное приспособление состоит из уголков - 1, которые жестко крепятся к П-образным хомутам - 2. В хомутах имеются отверстия с резьбой для болтов с игольчатыми наконечниками - 3. Посредством этих наконечников индикаторное приспособление крепится к балке в нейтральном слое в местах приложения сосредоточенных нагрузок, что позволило исключить влияние обмятия древесины под опорами на показания индикаторов.

Индикаторы (5') измеряют прогиб конструкции в месте приложения нагрузки, а индикатор (5) измеряет разность прогибов:

$$\Delta f = f_c - f_M. \quad (2.9)$$

Подставляя полученные результаты измерения разности прогибов в формулу (2.6) при величине $a=l_p/4$, получим значение модуля упругости.

Измеренное значение модуля упругости сравнить с табличным, учитывая, что при длительном нагружении происходит снижение модуля упругости (модуля деформаций) на 20%.

По результатам исследований сделать заключение.

Лабораторная работа №3

Ползучесть и длительная прочность древесины

при изгибе

3.1 Цель работы.

Оценка длительной прочности древесины на основании исследования скорости ползучести.

3.2 Описание работы.

Моделирование реономной среды, к которой относится клееная древесина, возможно на основе механических моделей, содержащих набор упругих вязких и пластических элементов. При этом физическая сущность процесса не рассматривается, а соответствующим выбором коэффициентов уравнений ползучести можно получить совпадение с экспериментальными результатами. Изменение режимов нагружения (например, циклическая нагрузка) и напряженного состояния требует определения спектров величин коэффициентов в основное уравнение ползучести. Физические модели содержат некоторое число величин, которые имеют смысл констант и не зависят от напряженного состояния и режимов нагружения. Их зависимость определяется структурным состоянием деформируемой среды. Поэтому применение физических моделей является более перспективным для описания процессов деформирования при различных режимах нагружения и напряженного состояния элемента.

Нагруженный элемент будем рассматривать как резервуар нестабильных кинетических элементов, релаксирующих путем изменения своих состояний посредством тепловых флуктуаций. При смене состояния кинетического элемента он претерпевает деформацию со скоростью $\dot{\varepsilon}_i$, равной

$$\dot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(-\frac{U_i - \gamma_i \sigma_i^*}{kT_i}\right), \quad (3.1)$$

где U_i – энергия активации процесса деформирования, кДж/моль;

γ_i – структурный параметр, кДж/моль·МПа;

σ_i^* – механическое напряжение, МПа;

k – постоянная Больцмана, кДж/К;

T_i – температура, К;

$\dot{\varepsilon}_0$ – постоянная, с.

Температура зависимости (3.1) указывает на термоактивированную природу деформации. Этот вывод был впервые сделан Александровым А.П. для полимеров и в настоящее время является справедливым для любых материалов.

Одним из наиболее важных на практике деформационных эффектов является ползучесть материалов и элементов конструкций.

Для конструкций при изгибе кроме деформаций в элементах сечений исследуется изменение прогиба, т.к. он является определяющим при их расчете по второй группе предельных состояний. Качественный вид кривых $f=F(t)$ и $\varepsilon=F(t)$ совпадает (здесь f – прогиб элемента) (см. рис 3.1)

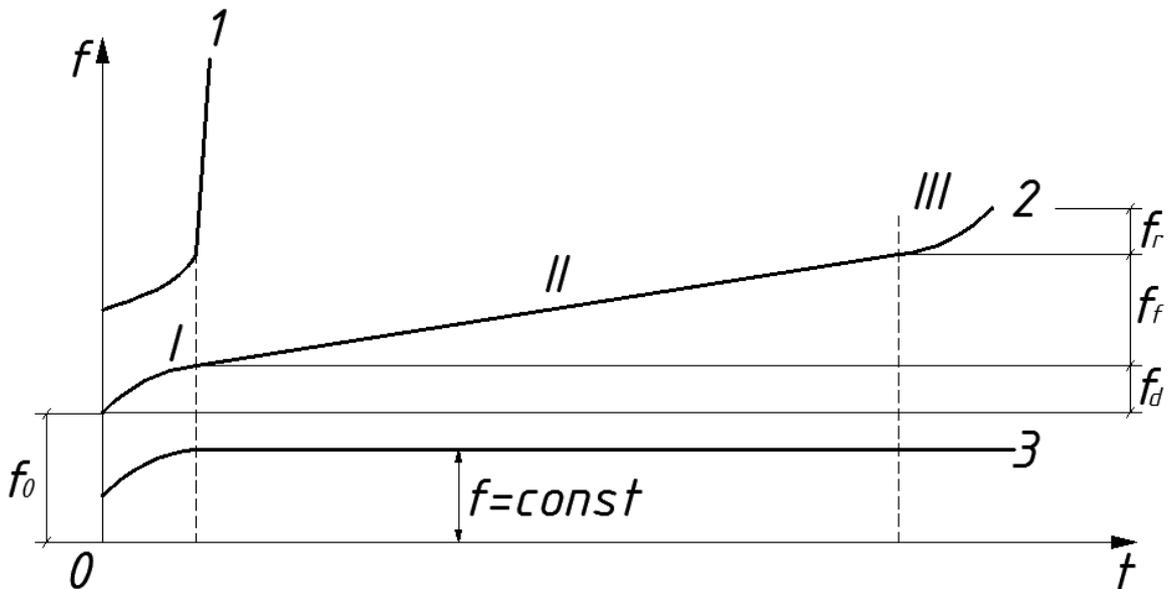


Рис. 3.1. Кривые ползучести для различных уровней напряжений: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

В общем случае, если процесс деформирования заканчивается разрушением, на кривой ползучести можно выделить три стадии (см. кривую 2 на рис. 3.1), отличающиеся знаком производной скорости прогиба \dot{f} . На первой стадии $\dot{f} < 0$, на второй $\dot{f} \approx 0$, на третьей $\dot{f} > 0$. При высоких уровнях нагружения (кривая 1 на рис 3.1) кривая ползучести вырождается в прямую – квазистатическое деформирование. Низкие уровни нагружения $\sigma_3 \leq \sigma_{\text{дл}}$ (здесь $\sigma_{\text{дл}}$ – предел длительного сопротивления) характеризуется графиком деформирования с горизонтальной асимптотой (затухающая ползучесть).

При описании кривой ползучести физически основным представляется двухмодовый процесс, содержащий «мягкую моду» чистого деформирования и «жесткую моду», в которой деформирование связано с трещинообразованием. На начальной стадии деформирования мягкая мода характеризуется в выражении (3.1) меньшим значением энергии активации, чем жесткая мода, поэтому является более быстрой и лимитирует скорость процесса. По мере её истощения или торможения, что проявляется в возрастании энергии активации, основной становится жесткая мода. Такой режим деформирования сопровождается накоплением трещин, их слиянием с образованием маги-

стральной трещины и заканчивается разрушением элемента. Отсюда следует, что деформация мягкой моды являются обратимыми, а деформации жесткой моды – не обратимы.

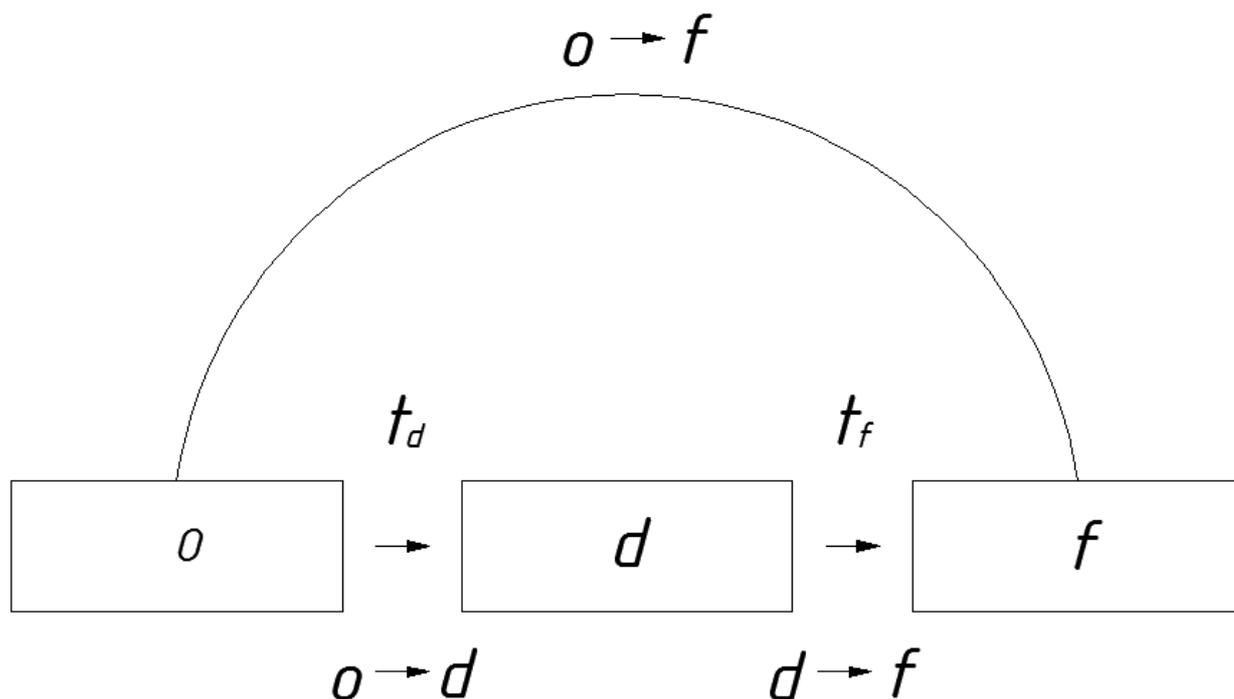


Рис.3.2. Схемы развития кинетического элемента:
 $o \rightarrow d$ переход-деформирование; $d \rightarrow f$ переход-разрушение

Следуя высказанным выше соображениям о двухмодовом характере деформирования, будем полагать, что элементы нагруженного тела могут находиться в трех состояниях: начальном, продеформированном и разрушенном. Граф состояний элемента (характеризующих их величины отмечаем соответственно o, d, f) и их последовательность показаны на рис. 3.2.

Элемент из начального o -состояния совершает $o \rightarrow d$ переход посредством тепловой флуктуации со средним временем ожидания

$$t_d = t_0 \exp[(H_0 - h\sigma)/kT], \quad (3.2)$$

где t, H_0, h – параметры состояния; и затем разрушается – переходит в f -состояние (с образованием магистральной трещины) через среднее время

$$t_f = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/kT], \quad (3.3)$$

где τ_0, U_0, γ – параметры, входящие в уравнение С.Н. Журкова.

Пусть f_d и f_f усредненные вклады в прогиб образца одиночных $o \rightarrow d$ и $d \rightarrow f$ переходов. Если P_o и P_d соответствующие вероятности нахождения элементов в o и d -состояниях, то для скорости прогиба \dot{f} имеем

$$\dot{f} = f_d(P_0/t_d) + f_f(P_d/t_f), \quad (3.4)$$

где $P_0 = \exp(-t/t_d)$; $P_d = \frac{1}{1-t_d/t} \exp(-t/t_f) - \exp(-t/t_d)$

Интегрирование (3.4) в условиях $t = \text{const}$ для $0 < t < t_f$ при наличии малого параметра

$$\eta = \frac{t_d}{t_f} \ll 1, \quad (3.5)$$

Дает зависимость $f(t)$ в виде

$$f = \int_0^t \dot{f} dt = f_0 + f_d \left(1 - e^{-\frac{t}{t_d}}\right) + \frac{f_f t}{t_f}, \quad (3.6)$$

где f_0 - начальная компонента прогиба (см. рис. 3.1)

При $t < t_d$, т.е. на второй стадии, в уравнении (3.6) имеем

$$\dot{f}_2 = (f_0 + f_d) + \frac{f_f t}{t_f}; \quad t_d < t < t_f. \quad (3.6a)$$

В силу независимости \dot{f}_2 от времени эту стадию ползучести называют стационарной, а деформирование на этой стадии контролируется актами термоактивированного разрушения.

Зависимость скорости прогиба \dot{f}_2 от уровня нагружения K_H (где $K_H = \sigma^*/R_{вр}^*$, здесь σ^* - напряжение; $R_{вр}^*$ - временное сопротивление древесины при $t \rightarrow 0$ линейна. Поскольку долговечность $\tau = t_f$, то оказывается, что

$$\Delta = \dot{f}_2 \tau = \text{const} \quad (3.6b)$$

Величина $\dot{f}_2 \tau$ остается постоянной в широком диапазоне вариации уровней нагружения.

3.3 Проведение экспериментов

Экспериментально установлен в ЮЗГУ на кафедре ПСЗиЛС тот факт, что в зависимостях

$$t_p = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\tau}{RT}\right); \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{U_0^d - \gamma_d\tau}{RT}\right). \quad (3.8)$$

Величины $U_0 = U_0^д$, $\gamma = \gamma_д$, а $\tau_0 = \frac{1}{\varepsilon_0}$.

Перемножив правые и левые части уравнений (3.7) и (3.8) получим следующее

$$t_p \cdot \varepsilon = 1 \tag{3.9}$$

Полученная зависимость (3.9) позволяет прогнозировать долговечность на основании исследований скоростей ползучести.

Порядок проведения эксперимента заключается в следующем.

По данным испытания образцов (Лабораторная работа №1) определена величина кратковременной разрушающей нагрузки. Для испытаний необходимо минимум три образца. На первый образец необходимо приложить нагрузку равную 0,9F раз, на второй – 0,85F раз, на третий 0,8F раз.

Через равные промежутки времени необходимо фиксировать величину прогиба через индикаторы часового типа с ценой деления не более 0,01мм. Эксперимент можно считать законченным, если наблюдается одинаковый прирост прогибов, т.е. это участок 2 на кривой ползучести.

Желательно для более точного определения уровня нагружения разрушить образцы и уточнить величину разрушающей нагрузки.

По результатам экспериментов определяем скорость роста прогибов каждого образца:

$$\dot{f}_i = \frac{f_{K_i} - f_{H_i}}{\Delta t_i} \tag{3.10}$$

Результаты экспериментов наносим на график $F_i / F_{раз} - \dot{f}$ (см. рис. 3.3).

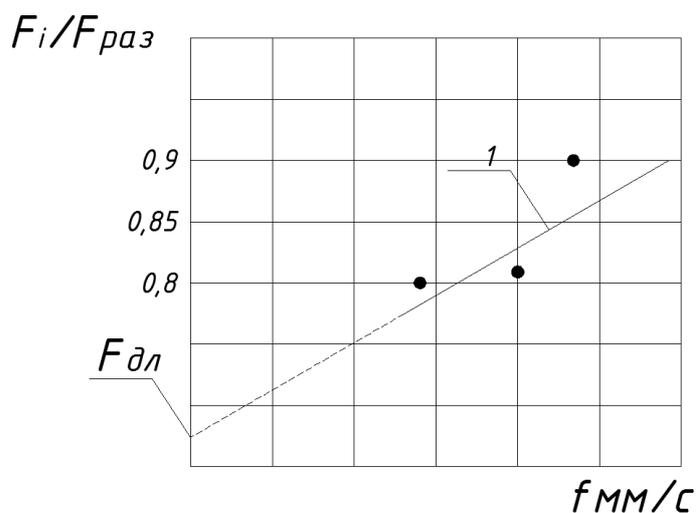


Рис. 3.3 График зависимости $F_i / F_{раз} - \dot{f}$

Экстраполируя прямую 1 к оси $F_i / F_{раз}$, получим величину $m_{дл} = F_{дл} / F_{раз}$.

Полученный результат сравнить с табличными (нормативными) данными и сделать выводы по результатам исследований.

Лабораторная работа №4

Исследование работы нагельного соединения древесины

4.1. Цель работы.

Исследование несущей способности и деформативности симметричного соединения на стальных цилиндрических нагелях при статической нагрузке.

4.2. Описание работы

Цилиндрическим нагелем называется гибкий стержень, препятствующий сдвигу соединяемых элементов, и работающий в основном на изгиб.

Схема работы нагеля в «гнезде» показана на рисунке 4.1.

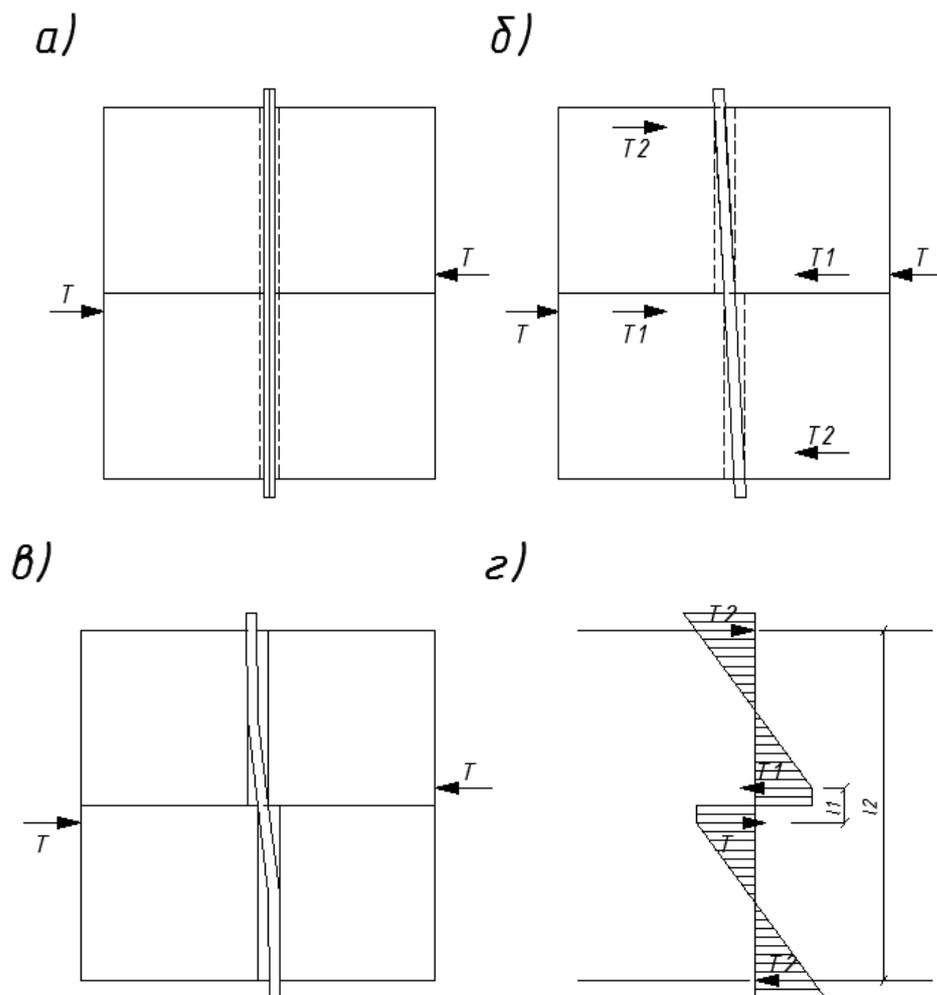


Рис. 4.1. Схема работы нагеля:

- а) первоначальное положение нагеля; б) поворот нагеля в «гнезде»;
- в) деформированный нагель;
- г) эпюры упругопластических напряжений в древесине (здесь, T – движущее усилие; T_1 и T_2 – равнодействующие сжимающих напряжений в древесине).

Сдвигаясь, силагиваемые элементы стремятся повернуть нагель. После некоторого поворота, обусловленного неплотностями и обмятием древесины, нагель упирается в нее сначала по краям элементов, а затем начинает изгибаться.

Поверхность контакта нагеля с древесиной увеличивается; это вызывает появление в ней неравномерных напряжений смятия по всей длине нагеля.

Напряжение смятия древесины нагелем имеют разные знаки, и их равнодействующие образуют две пары взаимно уравновешенных продольных сил, препятствующих повороту нагеля. Моменты этих пар равны по уравнению равновесия:

$$T_1 e_1 = T_2 e_2; \quad (4.1)$$

или

$$T_1/T_2 = e_2/e_1 \quad (4.2)$$

В нагельных соединениях отсутствуют поперечные силы, образующие распор; равновесие нагеля обеспечивается только продольными силами.

В древесных соединениях отношение длины нагеля к его диаметру значительно, в связи с чем нагель является гибким стержнем, работающим главным образом на изгиб и неравномерно сминающим древесину нагельного гнезда.

Срезающие напряжения в данном случае имеют второстепенное значение и могут не учитываться в расчете.

Нагель будет работать на изгиб как балка, лежащая на сплошном упругопластическом основании, за которое может быть принята древесина нагельного гнезда. По длине нагеля напряжения древесины смятию будут неравномерными. Эта неравномерность тем больше, чем меньше жесткость нагеля.

Смятие под нагелем будет неравномерным также и по его поперечному сечению (рис.4.2).

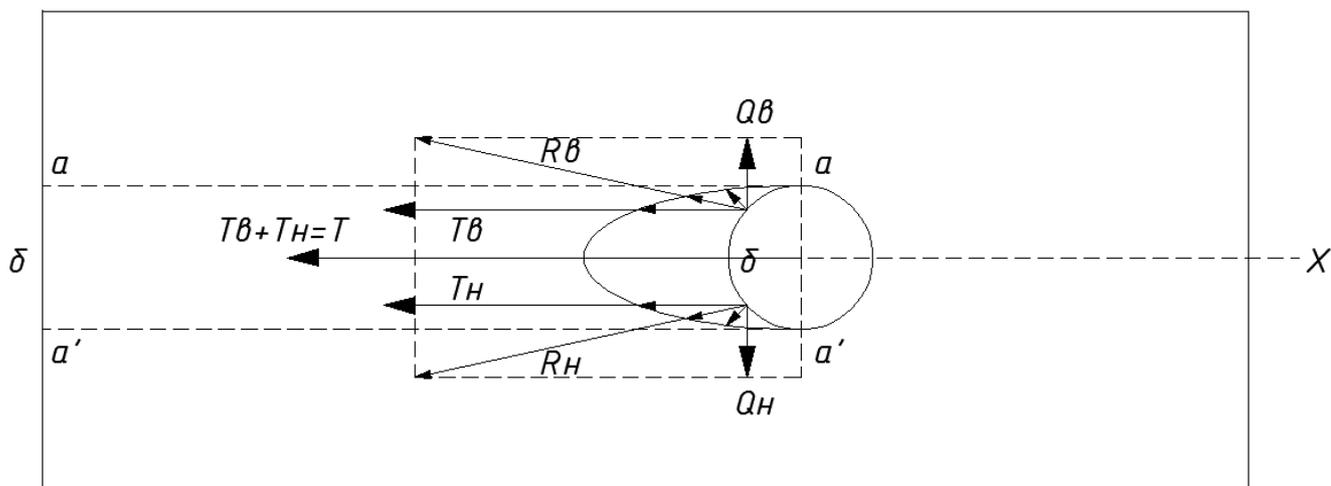


Рис. 4.2. Эпюры радиальных напряжений смятия древесины нагельного гнезда.

Как показали исследования, радиальные напряжения смятию в поперечном сечении нагеля характеризуются следующей зависимостью:

$$\sigma_2 = \sigma_{\text{см.ср.}} \frac{\left(\cos \varphi - \cos \frac{\varphi_0}{2} \right) \cos \varphi}{\left(1 - \cos \frac{\varphi_0}{2} \right)^2}; \quad (4.3)$$

$$\sigma_{\text{см.ср.}} = T / (\delta \alpha). \quad (4.4)$$

При упругой работе древесины значение

$$1 - \cos \frac{\varphi_0}{2} = 0,85(1 - 0,1\alpha), \quad (4.5)$$

С учетом пластической работы древесины

$$1 - \cos \frac{\varphi_0}{2} = 0,8(1,1 - 0,11\alpha), \quad (4.6)$$

Равнодействующие радиальных напряжений, будучи разложены, дают две составляющие: продольную T и поперечную Q .

Продольная составляющая вызывает появление напряжений скалывания по площадкам a - a и a' - a' . Поперечные составляющие (Q_H и Q_B) стремятся расколоть деревянный элемент по линии δ - δ , и здесь появятся нормальные напряжения растяжению поперек волокон.

Анализируя вышеприведенное, можно сказать, что напряженное состояние начального соединения характеризуется:

- изгибом нагеля;
- смятием древесины нагельного гнезда;
- скалывание древесины между нагельями;
- раскалывание древесины.

Несущая способность одного среза нагеля должна быть определена из всех указанных четырех условий напряженного состояния соединения.

Несущая способность нагеля по скалыванию и раскалыванию зависит от расстояния между нагелями. Это расстояние нормируется. При соблюдении минимального расстояния между нагелями несущая способность соединения будет лимитироваться только из условий изгиба нагеля и смятия древесины нагельного гнезда в обоих прилегающих к шву элементах.

Несущая способность нагеля по его изгибу и смятию древесины меньше разрушающей силы и ограничивается величиной предельного смещения элементов относительно друг друга. Эта величина составляет 2 мм.

Расчетное количество нагелей можно определить по формуле:

$$n \geq N / (m \cdot [T]_{\min}), \quad (4.7)$$

где N – расчетное усилие;

m – количество срезов нагеля;

$[T]_{\min}$ – минимальная несущая способность одного нагеля на один срез из условия изгиба или смятия элементов.

Количество срезов определяется из условия:

$$m = K - 1 \quad (4.8)$$

где K – количество элементов или усилий движущихся или действующих в противоположных направлениях (рис. 4.3.)

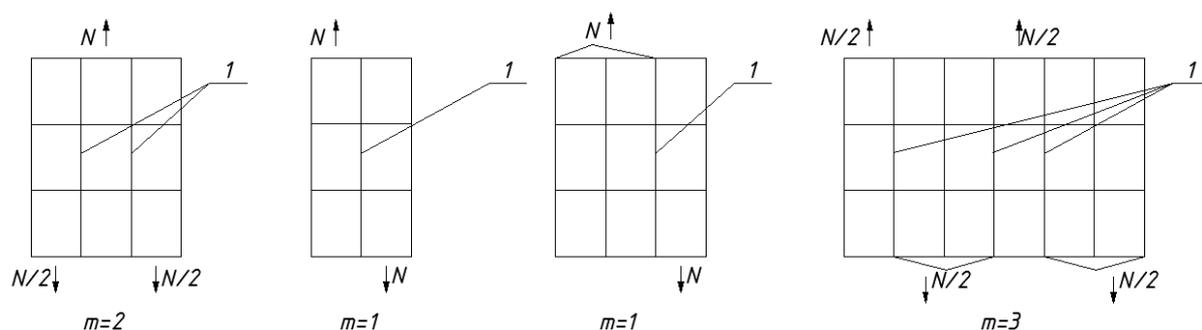


Рис. 4.3. К определению количества срезов нагеля

Термин «срез» употребляется для характеристики плотностей сдвига, поскольку срезать деревянным элементом стальной нагель нельзя.

4.3. Проведение экспериментов.

Для исследования несущей способности и деформативности использовали образец симметричного двухсрезного начального соединения (рис. 4.4.) на стальных цилиндрических нагелях. Древесина – сосна 2 сорта.

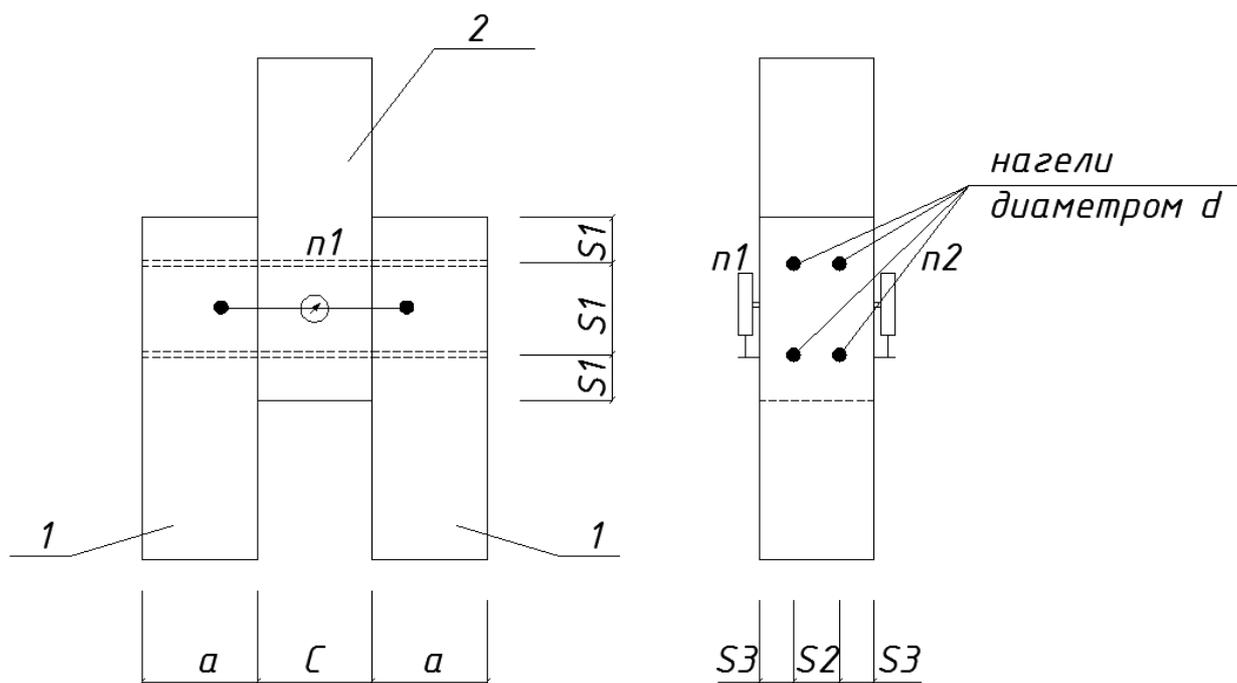


Рис.4.4. Экспериментальный образец

Размещение нагелей соответствует требованиям СП 64.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП II – 25 – 80), что предотвращает преждевременное разрушение древесины нагельных гнезд от скалывания и раскалывания.

Экспериментальный метод оценки несущей способности нагельного соединения заключается в следующем.

Предварительно, изменив необходимые геометрические параметры соединения (a, c, d , см. рис. 4.4) устанавливают его теоретическую несущую способность по формуле:

$$T_T = ([T]_{\min} \cdot m \cdot n) / m_{\text{дл}}, \quad (4.9)$$

где m – количество расчетных швов «среза» одного нагеля;

n – количество нагелей;

$m_{\text{дл}} = 0,66$ – базовое значение коэффициента длительной прочности;

$[T]_{\min}$ – наименьшая расчетная несущая способность нагеля на один «срез».

Расчетная несущая способность цилиндрического нагеля на один срез определяется по следующим формулам (размерность в см):

– из условия смятия крайнего элемента

$$T_1 = 0,8 \cdot a \cdot d \quad (\text{кН}); \quad (4.10)$$

– из условия смятия среднего элемента

$$T_2 = 0,5 \cdot c \cdot d \quad (\text{кН}); \quad (4.11)$$

– из условия изгиба нагеля (гвоздя)

$$T_3 = 2,5d^2 + 0,01a^2 \quad (\text{кН}); \quad (4.12)$$

Но не более

$$T_4 = 4,0d^2 \text{ (кН)}; \quad (4.13)$$

Из этих значений выбирают наименьшее и подставляют в формулу (4.9).

Для определения экспериментальной величины несущей способности образца начального соединения необходимо настроить зависимость Т-Δ. Для этого на образце закрепляют два индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Нагружение образца производят ступенями величиной $0,1T_T$ с фиксацией на каждой ступени перемещений и с записью в журнал испытаний. Окончанием испытаний является разное падение нагрузки на силоизмерителе испытательной машины. По результатам испытаний строят зависимости Т-Δ (рис. 4.5)

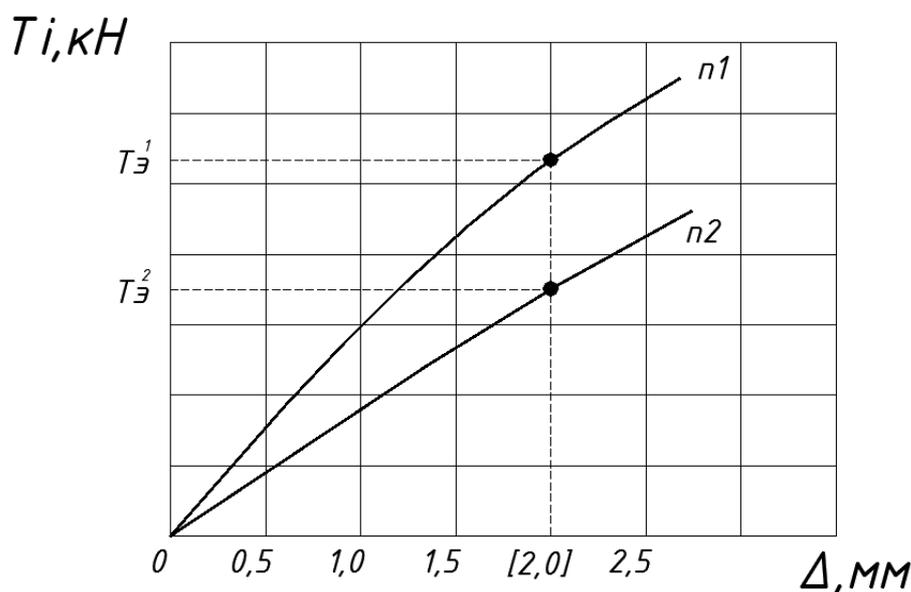


Рис. 4.5. К определению величины T_3 :
- зависимость 1 по индикатору n1;
- зависимость 2 по индикатору n2.

Экспериментально несущая способность начального соединения соответствует предельному смещению элементов 1 и 2 (см. рис. 4.5.) величиной $\Delta=2$ мм (см. рис. 4.5.) и устанавливается как среднее арифметическое из двух результатов:

$$T_3 = \frac{T_{\text{Э}}^1 + T_{\text{Э}}^2}{2}, \quad (4.14)$$

где T_3^1 - по индикатору n1;
 T_3^2 - по индикатору n2.

На основании выполненных исследований устанавливается характер разрушения, соответствие между T_T и T_3 и приводятся выводы.

Лабораторная работа №5

Исследование работы деревянной балки составного сечения на дискретных связях

5.1. Цель работы:

Определение модуля сдвига шва в составной балке на дискретных связях.

5.2. Описание работы.

Многие деревянные конструкции делают составными. Отдельные доски соединяют с помощью связей, которые могут быть жёсткими (или монолитными) и податливыми.

Податливостью называют способность связей при деформации конструкций давать возможность соединяемым доскам один относительно другого.

Податливость связей ухудшает работу составного элемента по сравнению с таким же элементом цельного сечения. Составной элемент на податливых связях обладает меньшей несущей способностью и большей деформативностью по сравнению с монолитным элементом, изменяется характер разделения сдвигающих усилий по его длине. Поэтому при проектировании составных элементов необходимо учитывать податливость связей.

Считается, что работа каждого отдельного стержня, входящего в составной элемент, подчиняется законам сопротивления материалов, и, в частности, закону плоских сечений. Поэтому внутреннее напряжённое состояние каждого стержня считается полностью определённым, если известны значения моментов, нормальных и поперечных сил в каждом поперечном сечении. Прогибы элементов считаются малыми по сравнению с их длиной, так же в геометрической задаче решается линейными уравнениями, а для стержня имеет место закон независимости действия сил.

Рассмотрим консольный элемент, состоящий из n -стержней нагруженный на конце сосредоточенной силой F (рис.5.1)

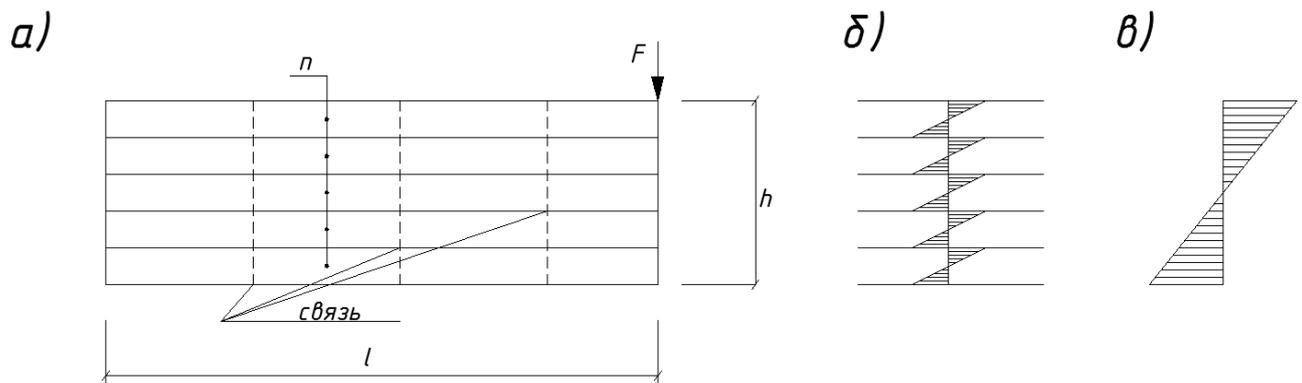


Рис.5.1. Работа составной (б) и монолитной балки (в)

При отсутствии сил трения каждый стержень из n – стержней элемента изгибается самостоятельно. Внешняя сила, приходящаяся на один стержень (слой), равна (F/n) , а наибольшее нормальное напряжение в поперечном сечении равно:

$$\sigma_{\max} = M / w_x = [(F/n)l] / (b/6) \cdot (h/n)^2 = (6Fl/bh^2) \cdot n \quad (5.1)$$

Для монолитного элемента нормальные напряжения в n -раз меньше:

$$\sigma_{\max} = 6Fl / (bh^2) \quad (5.2)$$

Кривизна монолитного элемента будет равна:

$$\frac{1}{\rho} = \chi = M / (EJ_x) = (12Fl) / (E_x h^3 b), \quad (5.3)$$

а составного –

$$\frac{1}{\rho} = \chi = [(F/n)l] / [E(b/12) \cdot (h/n)^3] = [(12Fl) / (Ebh^3)] \cdot n^2 \quad (5.4)$$

Таким образом, по сравнению с монолитным элементом, набор свободных (при отсутствии сил трения) сложенных стержней оказывается в « n^2 » более гибким и только в « n » раз менее прочным.

В швах между стержнями составного элемента действуют сдвигающие усилия. Чем больше относительная жёсткость связей, воспринимающих сдвигающие усилия в швах, и чем больше момент инерции всего сечения по сравнению с суммой моментов инерции отдельных элементов сечения без учёта работы связей, тем более «монолитным» становится элемент составного сечения на упруго податливых связях.

Таким образом, геометрические характеристики J_c, w_c составляют балки на податливых связях можно выразить через геометрические характеристики J, w балки цельного (монолитного) сечения, умноженного на коэффициенты меньше единицы:

– момент инерции составного сечения

$$J_c = K_j \cdot J, \quad (5.5)$$

– момент сопротивления составного сечения

$$W_c = K_w \cdot W \quad (5.6)$$

где K_j и K_w – коэффициенты учитывающие податливость дискретных связей.

Коэффициенты K_j и K_w определенные приближённым методом приведены в СП 64.13330.2011 (СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80) (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Значение коэффициентов K_j и K_w по СП 64.13330.2011

Коэффициент	Число слоёв в элементе	Значения коэффициента для расчёта изгибаемых составных элементов при пролётах, м
-------------	------------------------	--

		2	4	6	9 и более
K_w	2	0,7	0,85	0,90	0,90
	3	0,6	0,80	0,85	0,90
	10	0,4	0,70	0,80	0,85
$K_{ж}$	2	0,45	0,65	0,75	0,80
	3	0,25	0,50	0,60	0,70
	10	0,07	0,20	0,30	0,40

Точные решения для определения коэффициентов $K_{ж}$ и K_w связано с определением модуля жёсткости шва – $G_{шв}$. Соединение можно считать неподатливым, если $G_{шв} = G_{xy}$ (здесь G_{xy} – модуль сдвига цельной древесины $G_{xy} = 500$ МПа).

Для определения $G_{шв}$.

В пределах упругой работы сдвигаемых связей деформации сдвига $\Delta_{св}$ условию принимают прямо пропорциональными интенсивности сдвигающих сил T , приходящихся на единицу упругости шва:

$$\Delta_{св} = T / G_{шв} \quad (5.7)$$

где $G_{шв}$ – модуль сдвига шва.

Считается, что применяемые связи работают в упругой стадии в пределах расчётной для каждой из них нагрузки $T_{св}$, можно принять:

$$G_{шв} = [T_{св}] / (\Delta_{св} \cdot S_1), \quad (5.8)$$

где S_1 – шаг связей в продольной расстановке;

$\Delta_{св}$ – абсолютные значения сдвига для данной связи при расчётной сдвигающей нагрузке $[T_{св}]$;

$[T_{св}]$ – несущая способность связи на изгиб.

5.3. Проведение экспериментов.

В качестве образцов были взяты составные деревянные балки, состоящие из элементов, соединённых между собой дискретными связями. Балки состоят из элементов, соединённых между собой гвоздями диаметром 3 мм. Модельные балки состоят из 4-х слоёв (досок) толщиной 22,5 мм. Ширина балки $b = 95$ мм (см. рис.5.2).

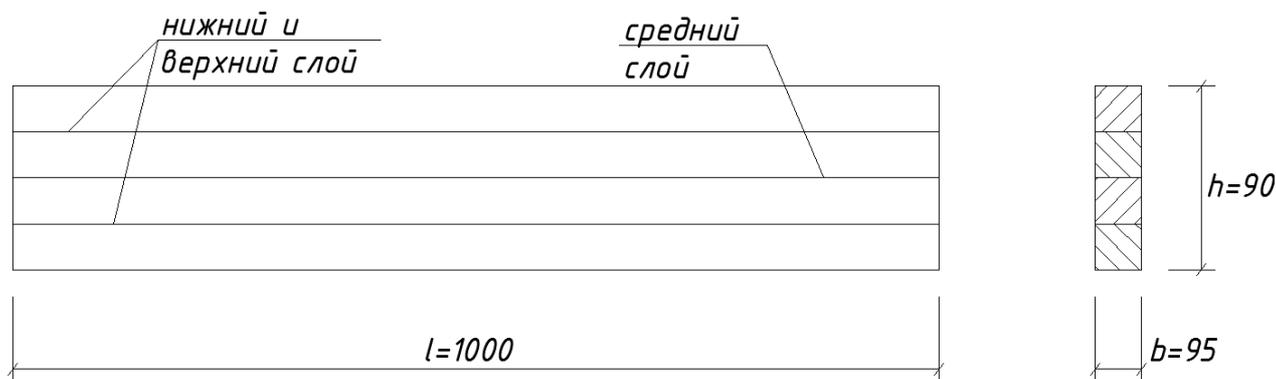


Рис.5.2. Вид модельной балки

Предварительно по п.п.5.18-5.21 СНиП II-25-80 было определено количество связей в швах.

На основании расчётов была выполнена расстановка связей сдвига в швах балки. Геометрические параметры балки и схема расстановки связей показаны на рис. 5.3. и 5.4.

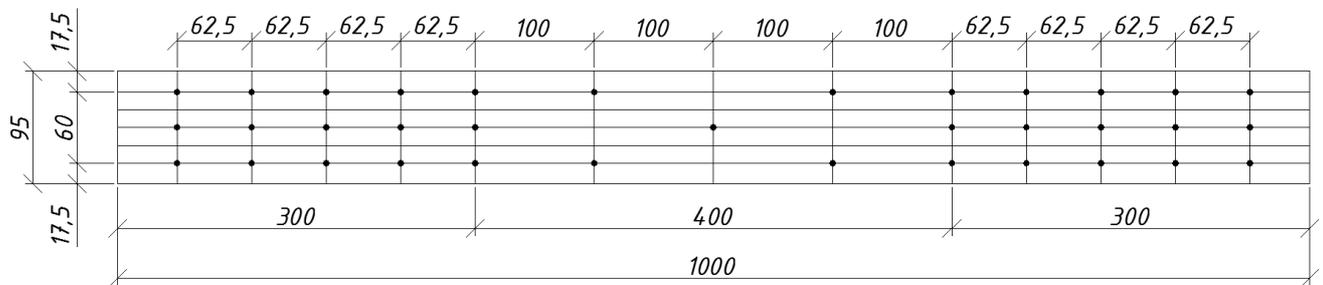
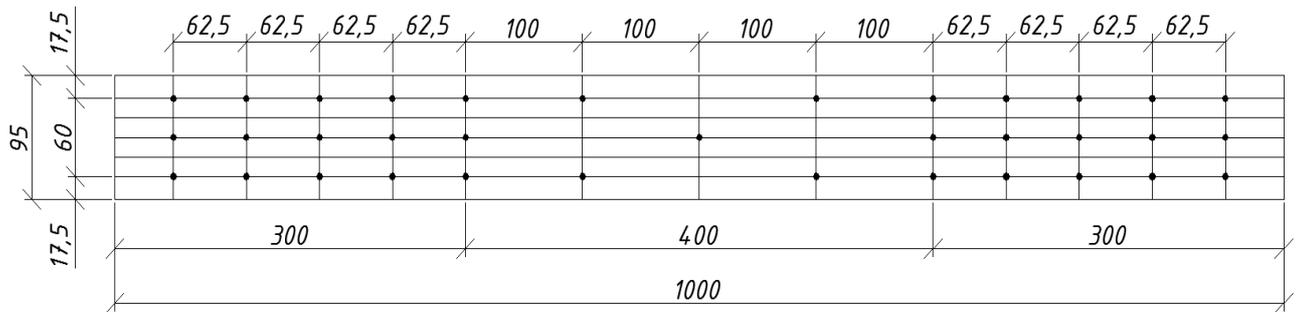


Рис.5.3. Схема расстановки связей в среднем слое

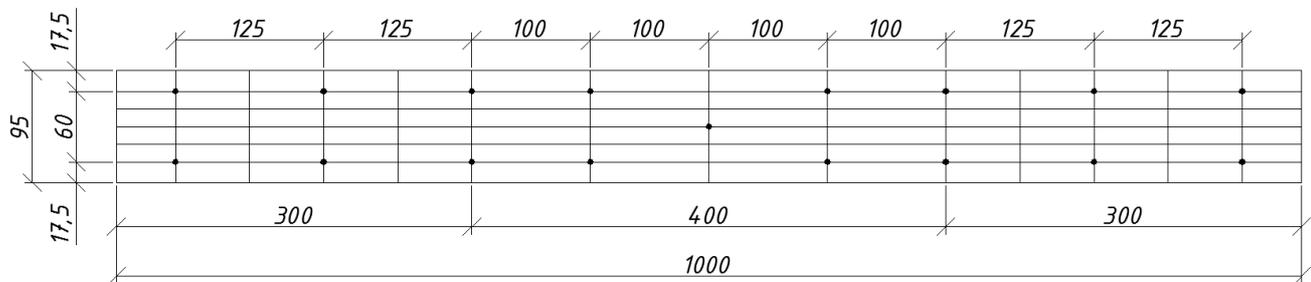


Рис.5.4. Схема расстановки связей в верхнем и нижнем слоях

Усилие в балке создается путём прикладывания нагрузки в двух точках, расположенных в четвертях пролёта (рис 5.5)

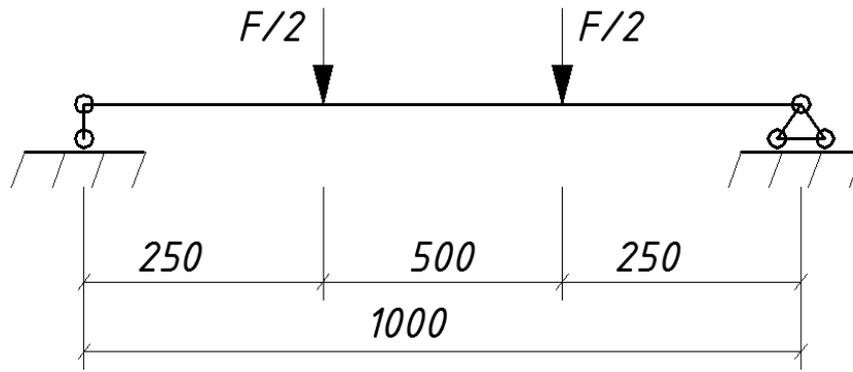


Рис.5.5 Схема нагружения балки

Алгоритм определения модуля сдвига шва заключается в следующем.

1. Предварительно определим несущую способность балки из условия достижения в крайнем волокне расчётного сопротивления изгибу:

$$F = \frac{8 \cdot b \cdot h^2 \cdot R_u \cdot K_w}{6 \cdot l \cdot 10} = \frac{8 \cdot 9,5 \cdot 9^2 \cdot 13 \cdot 0,57}{6 \cdot 100 \cdot 10} 7,60 \text{ кН.}$$

2. Необходимо определить несущую способность связи из условия изгиба (гвоздь $\varnothing 3$ мм):

$$\text{а) } [T_{св}]_1 = 2,5d^2 + 0,01a^2 = 2,5 \cdot 0,3^2 + 0,01 \cdot 2,25^2 = 0,276 \text{ кН}$$

$$\text{б) } [T_{св}]_2 = 4d^2 = 4 \cdot 0,3^2 = 0,36 \text{ кН}$$

3. Сдвигающее усилие от расчётной нагрузки будет равно:

а) в среднем слое (см. рис.5.2)

$$T_1 = \frac{QS_1}{J} = \frac{3F}{4h} = \frac{3 \cdot 7,6}{4 \cdot 9,0} = 0,633 \text{ кН/см;}$$

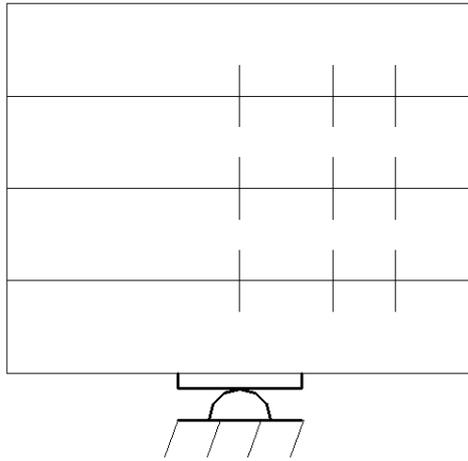
б) в нижнем и верхнем слое (см. рис.5.2)

$$T_2 = \frac{QS_2}{J} = \frac{9F \cdot \delta^2}{h^3} = \frac{9 \cdot 7,6 \cdot 2,25^2}{9^3} = 0,475 \text{ кН/см.}$$

4. Провести нагружение балки ступенями по 1,5 кН (150 кгс) в рычажной установке до нагрузки в 6,0 кН (600 кгс). На каждой ступени нагрузки отсчётным микроскопом МПБ-2 измерять смещение слоёв $\Delta_{св}$ относительно друг друга по рискам, нанесенным на балку (рис.5.6).

Результаты изменений занести в таблицу.

а)



б)

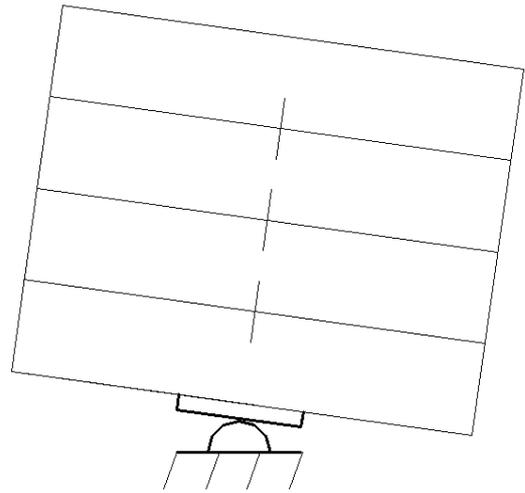


Рис.5.6. Характер смещается слоёв балки до приложения нагрузки (а) и после (б)

5. Определить на каждой ступени модуль сдвига шва по формуле (5.8)

$$G_{\text{шв}} = [T_{\text{св}}]_{\text{min}} / (\Delta_{\text{св}} \cdot S_1), \quad (5.9)$$

где $[T_{\text{св}}]_{\text{min}}$ взять из п.2 из $[T]_1$ и $[T]_2$.

6. По результатам измерений и вычислений построить график $G_{\text{шв}} - \Delta_{\text{св}}$.
Определить $G_{\text{шв}}$ при $\Delta_{\text{св}} = 0,12$ см.

7. По результатам работы сделать заключение.

Лабораторная работа №6

Исследование НДС клееной деревянной балки при изгибе

6.1. Цель работы.

Определить величину нормального и касательного напряжений в исследуемом сечении изгибаемого элемента.

6.2. Описание работы.

Характерной особенностью некоторых строительных материалов является анизотропия. Слово анизотропия происходит от сочетания двух греческих слов: анизос (неравный) и тропос (направление) и означает неодинаковость свойств материала (механических и деформационных) в различных структурных направлениях. Наиболее характерным строительным материалом, обладающим анизотропными свойствами, является цельная и клееная древесина, анизотропия которой определяется ее анатомическим строением.

В отличие от изотропных материалов, в анизотропных материалах

нормальные напряжения $\sigma'_{x'}$, действующие в произвольном направлении x' , вызывают не только продольные, но и угловые деформации (рис. 6.1, а), величина которых характеризуется коэффициентами взаимного влияния первого рода.

Касательные напряжения $\tau_{x'y'}$ в свою очередь могут быть причиной не только угловых, но и продольных деформаций (рис. 6.1, б), величина которых характеризуется коэффициентами взаимного влияния второго рода.

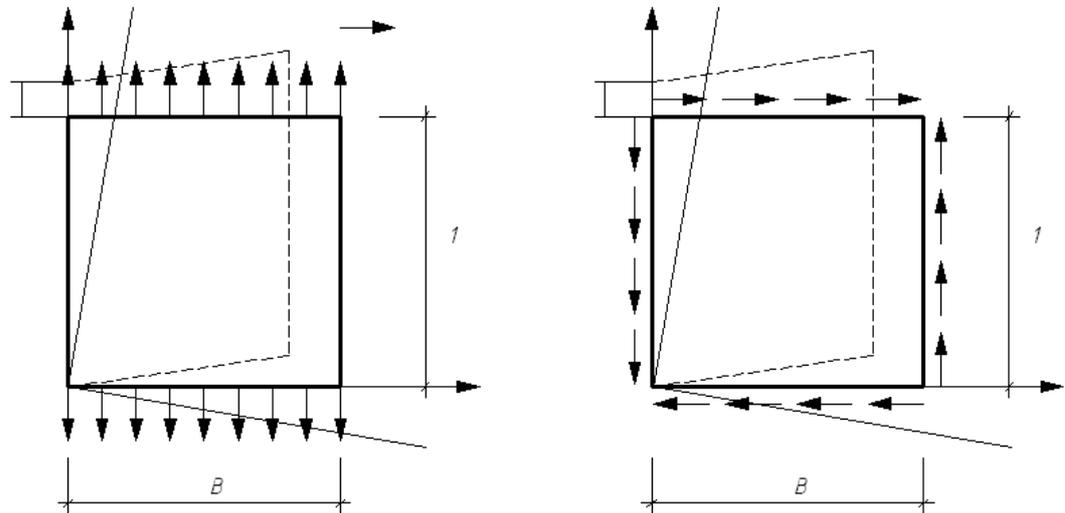


Рис. 6.1. Схематическое изображение деформации анизотропной полосы при одноосном растяжении (а) и при чистом сдвиге (б) (t и a - направления главных осей анизотропии)

Тот факт, что в анизотропном материале растягивающие напряжения, действующие не по оси симметрии, могут вызвать не только линейные, но и угловые деформации, приводит к отклонению направления наибольших удлинений от направления действующих напряжений. Направление главных (наибольших) деформаций не совпадает в этом случае с направлением главных (наибольших) напряжений (рис. 6.2). Положим, что растяжение анизотропного материала (рис. 6.2) происходит в направлении x' , составляющем некоторый угол α с направлением оси симметрии x и лежащем в плоскости симметрии xu . Угол φ между направлением наибольшего (главного) удлинения $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\max}$ и направлением действующего напряжения σ_x можно определить их уравнения

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\gamma_{x'y'}}{\varepsilon_{y'} - \varepsilon_{x'}}; \quad (6.1)$$

или

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\nu_{x',x'y'}}{1 + \mu_{x'y'}} \quad (6.2)$$

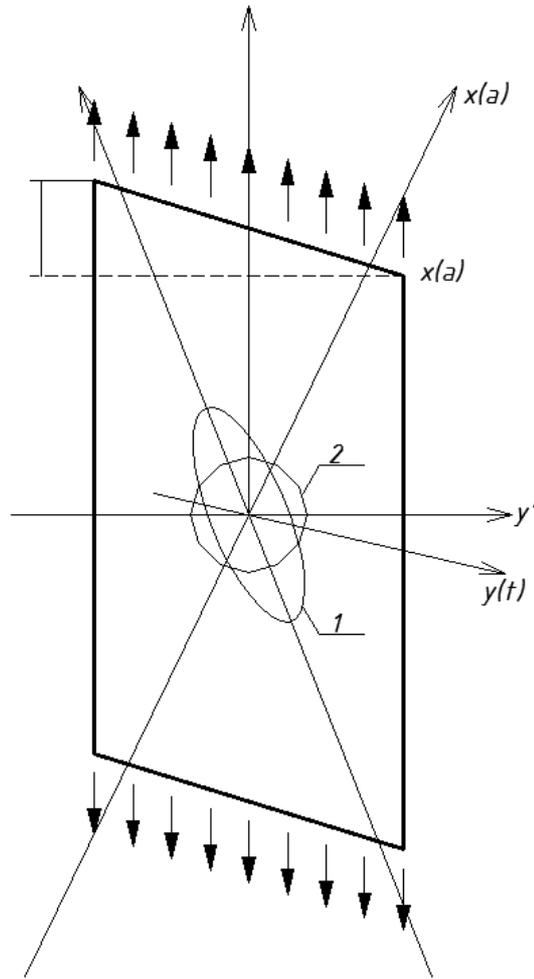


Рис. 6.2. Схематическое изображение эллипса деформаций (1) и напряжений (2) при растяжении под углом α к главным осям анизотропии (x, y)

Величину максимальной деформации ε_{\max} определяют по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{y'} - \varepsilon_{x'})^2 + \gamma_{x'y'}^2}, \quad (6.3)$$

или

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_{x'}}{2} \left[1 - \mu_{x'y'} + \sqrt{(1 + \mu_{x'y'})^2 + \nu_{x',x'y'}^2} \right]. \quad (6.4)$$

Формулы (6.3) и (6.4) определяют размер большой оси эллипса деформаций (рис. 6.2). Оси эллипсоида деформаций (1) не совпадают с осями эллипсоида напряжений (2) в анизотропном материале, если главные напряжения действуют не по осям упругой симметрии материала.

Рассмотренные деформации характерны только для анизотропного тела; они равны нулю в случае изотропии, а также в ортотропном теле, если нормаль площадки и действующие на нее напряжения направлены вдоль главных осей ортотропии.

К ортотропным материалам относятся такие, у которых имеются две оси симметрии прочностных или деформационных свойств.

Клееная древесина в изгибаемых элементах обладает определенной симметрией механических свойств и рассматривается как ортотропный материал, работающий в условиях плоского напряженного состояния.

В главных осях ортотропии (x, y) модули упругости обозначим через E_x и E_y , модуль сдвига G_{xy} , коэффициенты Пуассона – μ_x и μ_y . Коэффициенты взаимного влияния в этих осях равны нулю.

Плоское напряженно-деформированное состояние, характерное для изгибаемых элементов из клееной древесины и зависящее от всех компонент полевого тензора, в общем виде описывается системой из следующих уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon_{x'} = \sigma_{x'} / E_{x'} - \mu_{y'x'} \cdot \sigma_{y'} / E_{y'} + \nu_{x'y',x'} \cdot \tau_{xy'} / G_{xy'}; \\ \varepsilon_{y'} = \sigma_{y'} / E_{y'} - \mu_{x'y'} \cdot \sigma_{x'} / E_{x'} + \nu_{x'y',y'} \cdot \tau_{xy'} / G_{xy'}; \\ \gamma_{xy'} = \tau_{xy'} / G_{xy'} + \nu_{x',xy'} \cdot \sigma_{x'} / E_{x'} + \nu_{y',xy'} \cdot \sigma_{y'} / E_{y'}. \end{cases} \quad (6.5)$$

где – $\nu_{x'y',x'}$, $\nu_{y',x'y'}$ коэффициенты взаимного влияния соответственно первого и второго рода.

Индексы у коэффициентов взаимного влияния первого и второго рода стоящие за запятой, показывают направление напряжений, а после запятой – направление деформации. Штрихи у индексов определяют произвольность ориентации осей $x'y'$ в плоскости xy .

Теоретическое исследование характера распределения главных напряжений σ_1 и σ_3 в изгибаемых элементах из клееной древесины позволили установить следующую зависимость:

$$\varphi = 0,5 \arctg \left[\frac{E_{y'} \cdot \nu_{x',xy'} \cdot \sigma_1 + E_{x'} \cdot \nu_{y',x'y'} \cdot \sigma_3}{E_{y'} \cdot (1 + \mu_{x'y'}) \cdot \sigma_1 - E_{x'} \cdot (1 + \mu_{y'x'}) \cdot \sigma_3} \right]. \quad (6.6)$$

Выявлено, что максимальная величина угла φ в изгибаемых элементах меньше, чем при одноосном нагружении (растяжении или сжатии). Отклонение вектора главных деформаций – ε_{\max} от σ_1 в сторону направления, где прочность древесины уменьшается, наблюдается в растянутой зоне (см. рис. 6.3). Из рис. 6.3 видно, что на нейтральном слое (ось нулевых деформаций) вектор ε_{\max} совпадает с вектором σ_1 , т.е. диагональное направление является квазисимметричным и может рассматриваться как ось упругой симметрии материала.

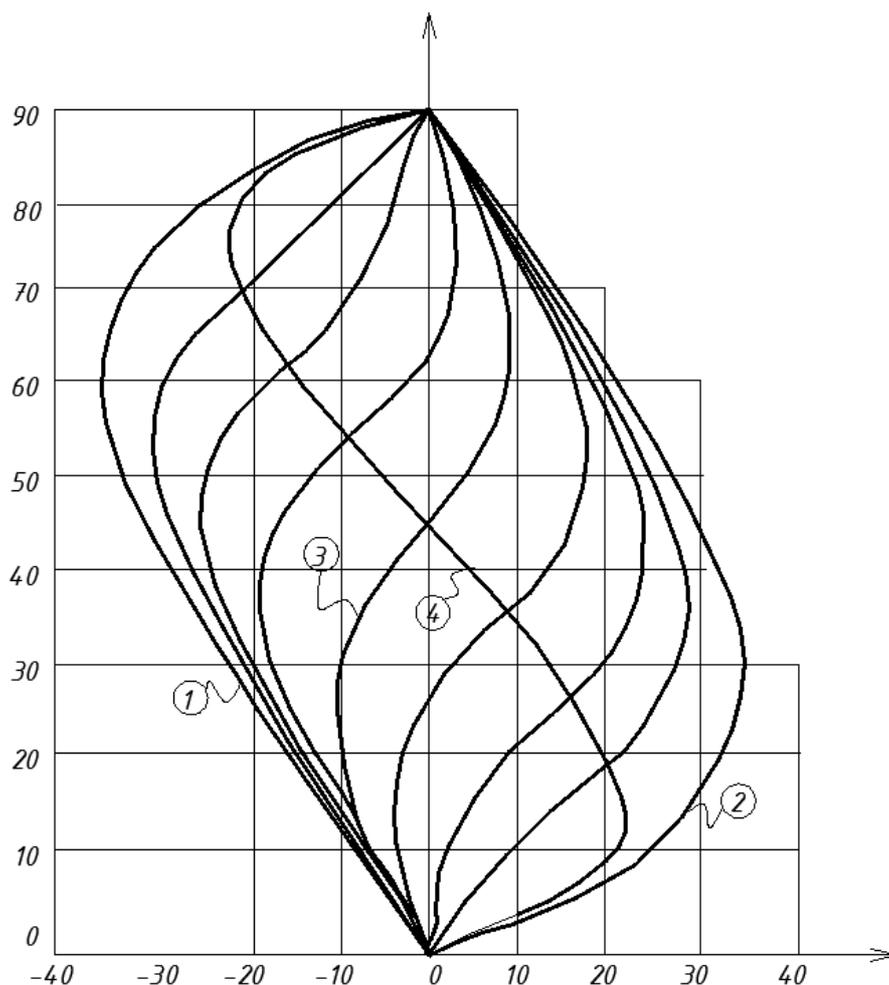


Рис. 6.3. Зависимость углов отклонений (φ) направления максимальных деформаций ($\varepsilon_1 = \varepsilon_{\max}$) от угла наклона (α_1) к направлению волокон древесины (x) главных растягивающих напряжений (σ_1) действующих в различных сочетаниях с главными сжимающими (σ_3): 1 – одноосное сжатие; 2 – одноосное растяжение; 3 – чистый сдвиг; 4 – кривая распределения величин φ по высоте сечения.

6.3. Проведение экспериментов.

Для исследования напряжений использована клееная деревянная балка составленная из восьми слоев досок склеенных по пласти. Размеры поперечного сечения балки - 30×160 мм. Расчетный пролет составляет 1200 мм. Балка нагружается двумя сосредоточенными силами в четвертях пролета (см. рис. 6.4).

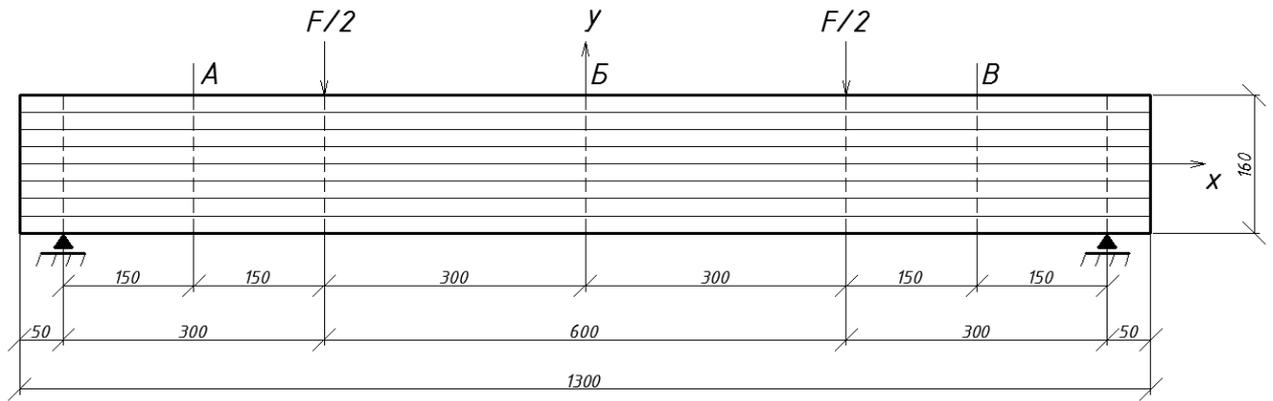


Рис. 6.4. Конструкция экспериментальной балки, схема ее нагружения и места наклейки тензорезисторов (ТР).

В общем случае деформативность анизотропного тела характеризуется 21-ной независимой постоянной. Клееная древесина в изгибаемых элементах обладает определенной симметрией механических свойств. Симметрия строения и характер напряженного состояния позволяет уменьшить число определяемых упругих характеристик. Клееная древесина в изгибаемых элементах рассматривается как трансверсально-изотропный материал, работающий в условиях плоского напряженного состояния.

При постоянных по времени напряжениях, температуре и влажности древесины связь между напряжениями и деформациями записывается в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{vmatrix}, \quad (6.7)$$

где S_{ij} – коэффициенты, определяющие податливость материала в направлении осей X и Y, совпадающих с материальными осями симметрии.

Матрица податливости при рассмотрении плоской задачи содержит 4 независимых компонента, т.к. равенство произведений $E_x \cdot \mu_{yx} = E_y \cdot \mu_{xy}$ выполняется с точностью до 15 %:

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\mu_{xy}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{E_0} & -\frac{\mu_0}{E_0} & 0 \\ -\frac{\mu_{90}}{E_{90}} & \frac{1}{E_{90}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_0} \end{vmatrix}. \quad (6.8)$$

В качестве независимой компоненты вместо G_{xy} можно принять модуль упругости в диагональном направлении E_{45}^0 , связь между которыми

определяется выражением:

$$\frac{1}{G_{xy}^{\pm}} = \frac{2(1 + \mu_{45^0}^{\pm})}{E_{45^0}^{\pm}}, \quad (6.9)$$

где $\mu_{45^0}^{\pm}$ – коэффициенты Пуассона, определяемые при действии нагрузки под углом 45° к волокнам древесины соответственно при растяжении (+) и сжатии (–).

Из матрицы податливости (6.8) вытекает очевидная связь коэффициентов податливости с техническими постоянными клееной древесины, которые можно определить экспериментально. Упругие характеристики древесины приведены в таблице 6.1.

Теоретические величины и характер распределения напряжений и деформаций в балке определены МКЭ, реализованного в форме метода перемещений, приведены на рис. 6.5...6.7. Величина нагрузки при этом равна $F = 28.8$ кН, а упругие характеристики древесины приняты по табл. 6.1.

Таблица 6.1.

Упругие характеристики клееной древесины

Наименование характеристики	Среднее значение характеристики			
	при растяжении (+)		при сжатии (–)	
	в радиальном направлении	в тангенциальном направлении	в радиальном направлении	в тангенциальном направлении
Модуль упругости, МПа				
$E_0 = E_x$	10000	10000	10000	10000
E_{45^0}	1530	1250	1600	1300
$E_{90} = E_y$	480	480	480	480
Модуль сдвига, МПа				
G_{xy}	520	420	630	470
Коэффициенты Пуассона				
$\mu_0 = \mu_{xy}$	0,400	0,400	0,400	0,400
$\mu_{45^0}^{\pm}$	0,474	0,483	0,265	0,381

При плоском напряженном состоянии максимальные – $\sigma_{\max} = \sigma_1$ и минимальные напряжения – $\sigma_{\min} = \sigma_3$ могут быть определены по формулам:

$$\sigma_{\max} = \frac{E_x}{1 - \mu_{xy} \cdot \mu_{yx}} (\epsilon_{\max} + \mu_{xy} \cdot \epsilon_{\min}); \quad (6.10)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E_x}{1 - \mu_{xy} \cdot \mu_{yx}} (\varepsilon_{\min} + \mu_{yx} \cdot \varepsilon_{\max}), \quad (6.11)$$

где ε_{\max} и ε_{\min} – максимальные и минимальные деформации, определяемые по результатам экспериментов.

Если направление главных напряжений известно, то ε_{\max} и ε_{\min} могут быть определены по формулам:

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_x + \mu_{xy} \cdot \varepsilon_y; \quad (6.12)$$

$$\varepsilon_{\min} = \varepsilon_y + \mu_{yx} \cdot \varepsilon_x; \quad (6.13)$$

где ε_x и ε_y – деформации в главных осях анизотропии.

Используя условие коаксиальности ε_{\max} с $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ и ε_{\min} с $\sigma_3 = \sigma_{\min}$ в опорных зонах, главные растягивающие и сжимающие напряжения в нейтральном слое можно определить по формулам:

$$\sigma_1 = \varepsilon_{45^0}^+ \cdot E_{45^0}^+ + \varepsilon_{45^0}^- \cdot E_{45^0}^-; \quad (6.14)$$

$$\sigma_3 = \varepsilon_{45^0}^- \cdot E_{45^0}^- + \varepsilon_{45^0}^+ \cdot E_{45^0}^+, \quad (6.15)$$

где $\varepsilon_{45^0}^+$ и $\varepsilon_{45^0}^-$ – экспериментально определенные деформации.

Величину максимальных касательных напряжений определяют по формуле

$$\tau_{xy} = \frac{|\sigma_1| + |\sigma_3|}{2}, \quad (6.16)$$

где σ_1 и σ_3 – величины напряжений, определенные по формулам (6.14) и (6.15).

Касательные напряжения можно также определить по формуле:

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} \cdot G_{xy}, \quad (6.17)$$

где $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{45^0} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90^0}$ – угол сдвига (здесь ε_{45^0} , ε_0 и ε_{90^0} – соответственно деформации в точке под углом 45^0 , 0^0 и 90^0 к главным осям анизотропии); G_{xy} – модуль сдвига (по табл. 6.1.).

Напряженное состояние, определяемое в исследуемой точке, можно установить по коэффициенту Лодэ

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (6.18)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения (при плоском напряженном состоянии $\sigma_2=0$).

Величина $\mu_\sigma=1$ соответствует растяжению (при этом $\sigma_3=0$);

$\mu_\sigma=-1$ соответствует сжатию (при этом $\sigma_1=0$);

$\mu_\sigma=0$ соответствует чистому сдвигу ($|\sigma_1|=|\sigma_3|$).

Результаты экспериментальных исследований обрабатываются по вышеприведенным формулам и заносятся в таблицы журнала. Полученные результаты сравнивают с теоретическими на основании этого производится заключение.

Лабораторная работа №7.

Исследование работы комбинированной конструкции.

7.1. Цель работы.

Определить величину и характер распределения напряжений по сечению элемента и вычислить коэффициент неравномерности напряжений.

7.2. Описание работы.

Строительные панели, состоящие из продольных ребер и обшивок, могут выполняться из различных конструкционных материалов, обладающих как одинаковыми свойствами во всех направлениях – изотропных, так и свойствами конструктивной анизотропии (фанера, стеклопластик и др.) (см. рис. 7.1). Поскольку ребристая панель представляет собой многостенчатую балку, обшивки включаются в работу восприятием сдвигающих усилий, приложенных по продольным кромкам ребер (рис. 7.2). Такой способ передачи усилий вызывает неравномерность распределения нормальных напряжений в обшивках (рис. 7.2, б). Задача сводится к определению приведенной ширины фанерных полок $b_{пр}$, составляющей обычно часть действительной их ширины в свету – b (рис. 7.2, в).

Для определения $b_{пр}$ рассмотрим работу фанерной полосы, нагруженной сдвигающими усилиями по продольным кромкам.

Для решения задачи воспользуемся дифференциальными уравнениями ортотропного тела:

$$\frac{E_2}{E_1} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} + \frac{E_2}{G} \left(1 - 2\mu \frac{G}{E_1} \right) \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} = 0, \quad (7.1)$$

где φ – функция напряжений (изгиб пластины не учитывается);

E – модуль упругости;

G – модуль сдвига (1 – обшивка, 2 – ребра).

Для случая равномерно распределенной нагрузки характер распределения сдвигающих усилий по продольным кромкам фанерной полки может быть принят в соответствии с эпюрой поперечных сил, т.е. по линейному закону:

$$T_x = \delta \cdot \tau_{xy} \alpha = (Q \cdot S) / J = \alpha \cdot T_{max}, \quad (7.2)$$

где Q – половина поперечной силы в рассматриваемом сечении;

δ – толщина фанеры;

τ_{xy} – сдвигающее напряжение;

T_{max} – максимальное сдвигающее усилие.

Для решения уравнения (7.1) зададимся функцией напряжений φ в виде полинома пятой степени с неопределенными коэффициентами и, пренебрегая из условия симметрии относительно осей x и y членами, содержащими x и y в нечетной степени, получаем

$$\varphi = ax^2 + by^2 + cx^2y^2 + y^4 + dx^2. \quad (7.3)$$

Искомые напряжения в фанерных полках при этом будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 2b + 2cx^2 + 12ly^2; \\ \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 2a + 2cy^2 + 12dx^2; \\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} = -4cxy. \end{array} \right. \quad (7.4)$$

Неопределенные коэффициенты вычисляются из граничных условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xy} \text{ при } y=b/2 = \tau_{\max} \cdot (x/l) = a \cdot x; \\ \sigma_y \text{ при } y=\pm b/2 = 0; \\ \int_{-b/2}^{+b/2} \sigma_x dy = 0; \\ \int_{-b/2}^{+b/2} \tau_{xy} dy = 0; \\ \int_{-b/2}^{+b/2} \sigma_x \cdot y dy = 0. \end{array} \right. \quad (7.5)$$

Производя соответствующие алгебраические вычисления, получим следующие формулы для определения напряжений в фанерной пластинке.

Нормальные напряжения по оси x:

$$\sigma_x = \frac{al^2}{4b} - \frac{ab}{12} \left(\frac{E_1}{G} - 2\mu \right) - \frac{ax^2}{b} + \frac{a}{b} \left(\frac{E_1}{G} - 2\mu \right) y^2. \quad (7.6)$$

Нормальные напряжения по оси y:

$$\sigma_y = \frac{ab}{4} - \frac{a}{b} y^2. \quad (7.7)$$

Касательное (сдвигающее) напряжение

$$\tau_{xy} = 2 \frac{a}{b} x \cdot y. \quad (7.8)$$

Максимальная величина этого напряжения при $x = 0$ и $y = b/2$ имеет вид:

$$\sigma_x = \frac{T_{\max} \cdot l}{2b} + \left(\frac{E_1}{G} - 2\mu \right) \frac{T_{\max} \cdot b}{3 \cdot l}. \quad (7.9)$$

Это выражение можно представить и в другом виде, если ввести сред-

нее нормальное напряжение σ_x^{cp} по среднему сечению пластинки. Из условия равновесия получаем

$$T_{\text{max}} = \sigma_x^{\text{cp}} \cdot \frac{2b}{l} \quad (7.10)$$

Введя в формулу (7.9) значение T_{max} и пренебрегая коэффициентом поперечных деформаций (коэффициентом Пуассона) μ ввиду его малой величины, получаем

$$\sigma_x^{\text{max}} = \sigma_x^{\text{cp}} \left(1 + \frac{2 E_1 b^2}{3 G l^2} \right), \quad (7.11)$$

а приведенная ширина фанерной полки равна

$$b_{\text{пр}} = b \frac{\sigma_x^{\text{cp}}}{\sigma_x^{\text{max}}} = \frac{b}{1 + \frac{2 E_1 b^2}{3 G l^2}} \quad (7.12)$$

Теоретическая величина коэффициента неравномерности распределения нормальных напряжений равна

$$K_{\text{н}}^{\text{т}} = \frac{1}{1 + \frac{2 E_1 b^2}{3 G l^2}} \quad (7.13)$$

где E_1 – модуль упругости фанерной обшивки;
 G – модуль сдвига фанерной обшивки.

7.3. Проведение экспериментов.

Экспериментально коэффициент неравномерности распределения нормальных напряжений σ_x по ширине обшивки определяется по формуле:

$$K_{\text{н}}^{\text{э}} = \frac{\sigma_x^{\text{cp}}}{\sigma_x^{\text{max}}}, \quad (7.14)$$

где σ_x^{cp} – среднее нормальное напряжение по ширине обшивки в рассматриваемом сечении;

σ_x^{max} – максимальное значение нормального напряжения, возникающее в месте их соединения с ребрами.

Для обшивок, выполненных из ортотропного материала, нормальные напряжения найдутся из уравнений обобщенного закона Гука:

$$\sigma_x = E_1(\varepsilon_x + \varepsilon_y \cdot \mu_{21}) / (1 - \mu_{21} \cdot \mu_{12}); \quad (7.15)$$

$$\sigma_x = E_2(\varepsilon_y + \varepsilon_x \cdot \mu_{12}) / (1 - \mu_{12} \cdot \mu_{21}), \quad (7.16)$$

где E_1, E_2 – модули нормальной упругости в направлении оси X (вдоль панели) и ей перпендикулярно;

$\mu_{12} = 0,07; \mu_{21} = 0,06$ – коэффициенты Пуассона материала обшивки (фанера);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – относительные деформации в направлении осей X и Y .

Для обшивок, выполненных из изотропных материалов (защищенная

сталь, алюминий, асбестоцемент и др.), $E_1 = E_2 = E$; $\mu_{21} = \mu = 0,2 \dots 0,4$ тогда

$$\sigma_x = E(\varepsilon_x + \varepsilon_y \cdot \mu) / (1 - \mu^2); \quad (7.17)$$

$$\sigma_y = E(\varepsilon_y + \varepsilon_x \cdot \mu) / (1 - \mu^2), \quad (7.18)$$

Таким образом, для экспериментального определения коэффициента K_H^3 необходимо измерить относительные деформации ε_x и ε_y в точках обшивки в одном или нескольких поперечных сечениях ребристой панели. Это возможно выполнить путем измерения деформаций тензорезисторами, наклеенными в различных точках по ширине обшивки перпендикулярно друг другу. Минимальное количество точек в поперечном сечении между ребрами (3-5), при большем их количестве точность определения коэффициента K_H^3 увеличивается.

Средние нормальные напряжения определяются как:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{cp} &= (1/b) \int_{-b/2}^{+b/2} \sigma_x dy \cong (1/b) \sum_{n=1}^n \sigma_x^i \Delta y^i \approx \\ &\approx (1/b) \sum_{n=1}^n \left[E_1 (\varepsilon_x^i + \varepsilon_y^i \cdot \mu_{21}) / (1 - \mu_{12} / \mu_{21}) \right] \end{aligned} \quad (7.19)$$

где $\varepsilon_x^i, \varepsilon_y^i$ – значения относительных деформаций в каждой точке по ширине сечения (показания тензорезисторов);

Δy^i – ширина участка панели между соседними точками измерений;

b – ширина панели.

Окончательно формула для определения K_H^3 после подстановки (7.19) в (7.14) имеет вид:

$$K_H^3 = (1/b) \sum_{n=1}^n \left[(\varepsilon_x + \varepsilon_y \cdot \mu_{21}) \Delta y^i / (\varepsilon_x^p + \varepsilon_y^p \cdot \mu_{21}) \right], \quad (7.20)$$

где ε_x^p и ε_y^p – относительные деформации обшивки в месте соединения их с ребрами.

Величины деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_x^p, \varepsilon_y^p$ можно определить с помощью тензорезисторов ТРх и ТРу, наклеивая их в расчетном сечении ($x = lp/2$) (см. рис. 7.3) в двух направлениях. Для этого в расчетном сечении панели необходимо создать напряжения величиной (0,15 – 0,20) от разрушающей нагрузки.

Разрушающая равномерно-распределенная по поверхности панели нагрузка может быть определена из следующих условий:

– из условия потери устойчивости верхней обшивки от сжатия:

$$q_1 = (8 \cdot \phi_\phi \cdot R_{\phi c}^{bp} \cdot W_{np}) / lp^2, \quad (7.21)$$

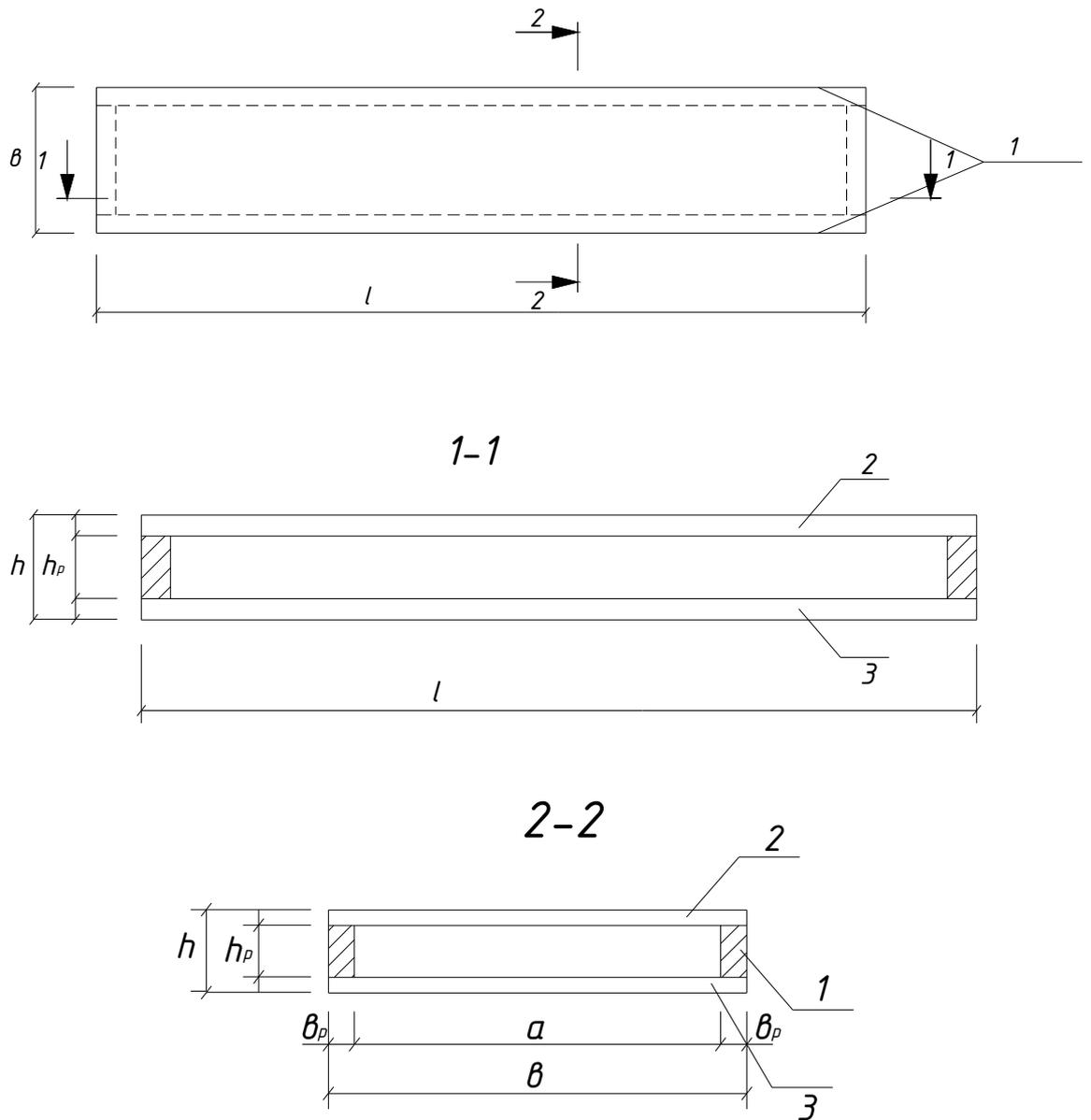
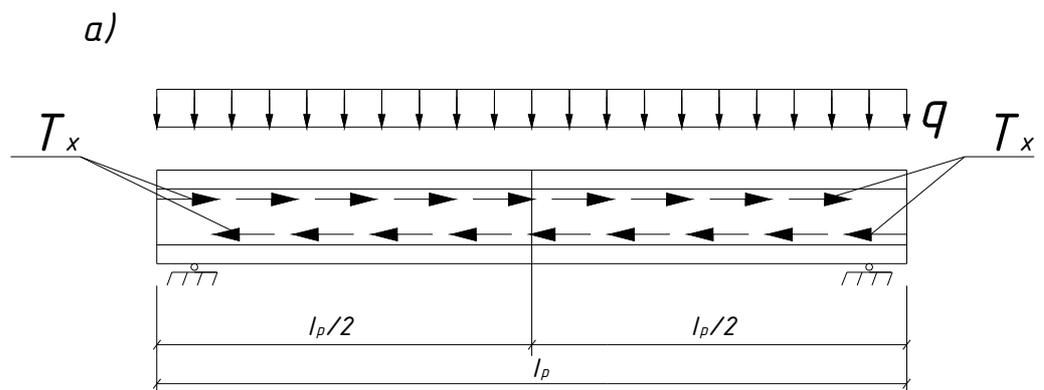
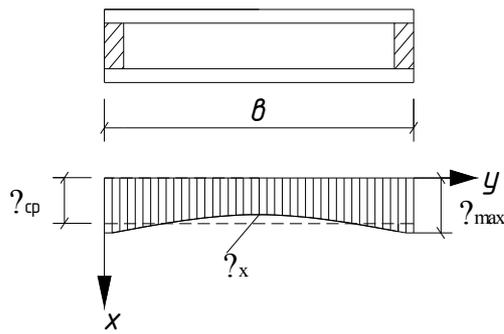


Рис.7.1. Конструкция панели: 1 – продольные ребра; 2 – верхняя обшивка; 3 – нижняя обшивка



δ)



б)

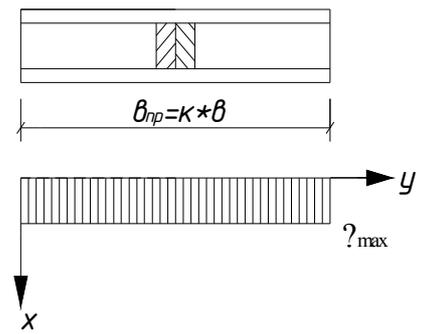
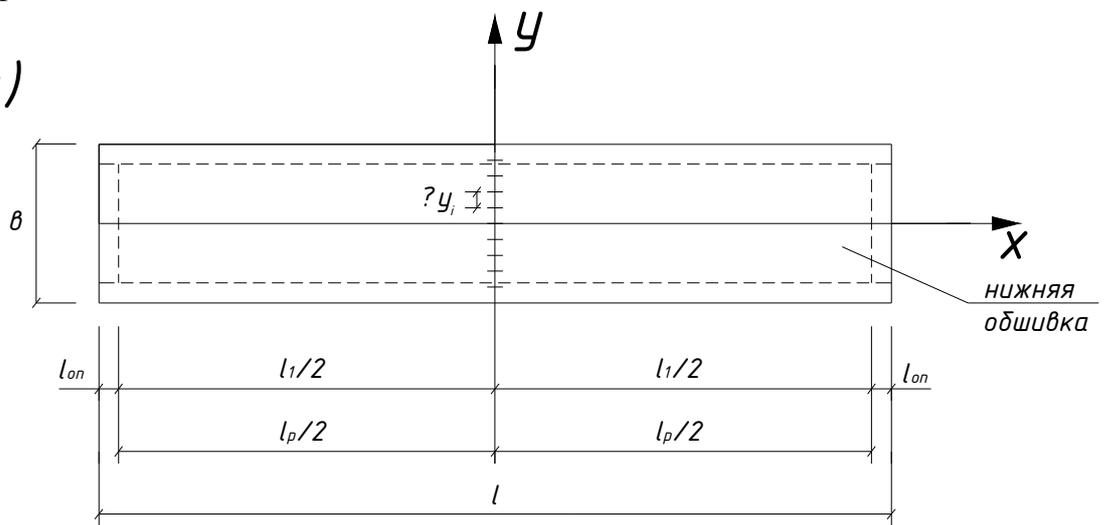
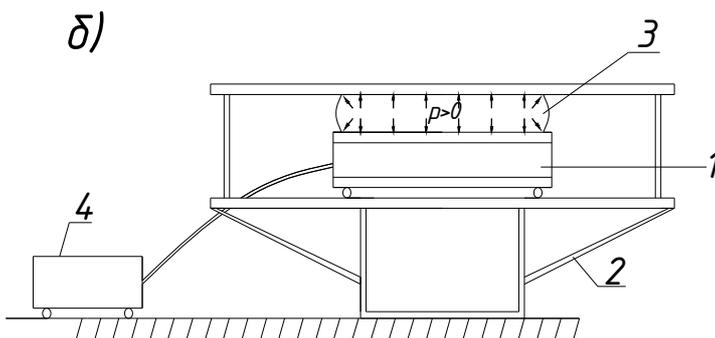


Рис. 7.2. Распределение напряжений в панели:
 а – распределение сдвигающих напряжений;
 б – распределение нормальных напряжений;
 в – расчетная схема панели.

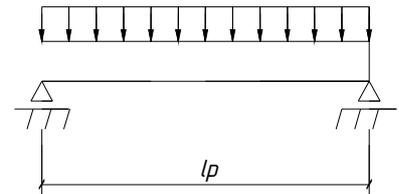
а)



δ)



б)



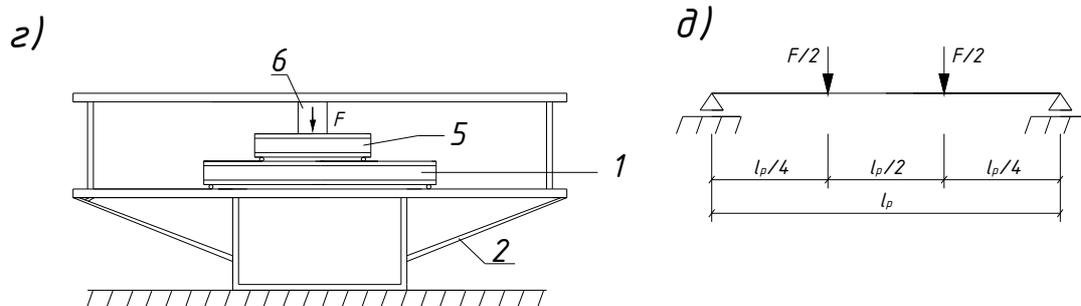


Рис. 7.3. Схема испытания панели:
 а) схема наклейки тензорезисторов;
 б) нагружение панели баллоном со сжатым воздухом;
 в) расчетная схема при нагружении с использованием сжатого воздуха;
 г) нагружение панели с использованием домкрата и распределительной траверсы;

д) расчетная схема при создании нагрузки с помощью домкрата.

1 – панель; 2 – установка; 3 – баллон со сжатым воздухом;

4 – компрессор; 5 – траверса; 6 – домкрат.

где φ_{ϕ} – коэффициент устойчивости обшивки;

$R_{\phi c}^{BP}$ – временное сопротивление фанеры сжатию;

$W_{пр}$ – приведенный момент сопротивления сечения панели;

l_p – расчетный пролет панели ($l_p = l - l_{оп}$);

– из условия разрушения нижней обшивки от растяжения

$$q_2 = (8 \cdot R_{\phi p}^{BP} \cdot W_{пр}) / l_p^2, \quad (7.22)$$

где $R_{\phi c}^{BP}$ – временное сопротивление фанеры растяжению;

– из условия скалывания в клеевых швах между ребрами и обшивками:

$$q_3 = (2 \cdot R_{ск \phi}^{BP} \cdot J_{пр} \cdot \sum b_p) / (l_p \cdot S_{про}), \quad (7.23)$$

где $R_{ск \phi}^{BP}$ – временное сопротивление фанеры скалыванию;

$J_{пр}$ – приведенный момент инерции панели;

b_p – ширина ребра плиты;

$S_{про}$ – статический момент сдвигаемой части (обшивки) относительно нейтральной оси;

– из условия скалывания в ребрах панели:

$$q_4 = (2 \cdot R_{ск др}^{BP} \cdot J_{пр} \cdot \sum b_p) / (l_p \cdot S_{пр}), \quad (7.24)$$

где $R_{ск др}^{BP}$ – временное сопротивление древесины скалыванию;

$S_{пр}$ – статический момент сдвигаемой части (обшивка и половина сечения ребер) относительно нейтральной оси.

Из величин q , полученных по формулам (7.21) – (7.24), необходимо выбрать наименьшую.

Нагрузку можно создать, используя баллоны со сжатым воздухом (рис.

7.3, б), и (или) с помощью домкрата с распределительной траверсой (рис. 7.3, г).

При нагружении домкратом необходимо чтобы две сосредоточенные силы ($F/2$) были приложены в четвертях пролета (см. рис. 7.3, д). В этом случае напряжения в расчетном сечении ($x = \ell/2$) будут равны напряжениям с нагружением в виде равномерно-распределенной по поверхности панели нагрузкой (см. рис. 7.3, в). Начальный отсчет по приборам снимают в момент когда нагрузка (q или $F=q\ell$) равны нулю, а конечный – при нагрузке 0,15 – 0,20 от разрушающей.

В качестве регистрирующей аппаратуры можно использовать различные тензометрические комплексы (АИД, ТК-2 и др.).

Результаты испытаний заносятся в таблицу журнала. По результатам работы производится заключение.

Заключение

Предлагаемый цикл работ по испытанию элементов, соединений и конструкций из клееной и цельной древесины позволит глубже оценить свойства древесины как анизотропного материала и использовать полученные знания при практических расчетах.

При постановке лабораторных работ использован опыт экспериментальных исследований, проведенных на кафедре Промышленного и гражданского строительства под руководством профессора Прокофьева А.С. и доцента Сморгкова А.А. и их учеников: аспирантов, магистрантов, бакалавров.

Полученные знания отвечают современным достижениям в области механики материалов.

Библиографический список

1. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция. СНиП II-25-80. – М.: Минрегион России, 2011. – 88 с.
2. Расчет конструкций из дерева и пластмасс: учеб. пособие для студ. вузов/ Ф.А. Бойтемиров, В.М. Головина, Э.М. Улицкая; под ред. Ф.А. Бойтемирова. - М.: Изд.центр «Академия», 2006. – 160 с.
3. Вдовин В.М, Карпов В.Н. Сборник задач и практические методы их решения по курсу «Конструкции из дерева и пластмасс»: Учебное пособие. – М.: ИАСВ, 1999. – 133 с.
4. Конструкции из дерева и пластмасс/ М.М. Гаппоев и др. – М.: АСВ, 2004. – 440 с.
5. Бойтемиров Ф.А. Расчет конструкций из дерева и пластмасс. – М.: Академия, 2007. – 160 с.