



А.М. Газизов
Е.С. Синегубова

КЛЕЕННЫЕ ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Екатеринбург
2018

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инновационных технологий и оборудования деревообработки

А.М. Газизов
Е.С. Синегубова

КЛЕЕНЫЕ ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Учебно-методическое пособие
к лабораторным занятиям по курсу
«Технология клееных деревянных конструкций»
для обучающихся по направлению 35.03.02 «Технология
лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств»
очной и заочной форм обучения

Екатеринбург
2018

Печатается по рекомендации методической комиссии ИЛБиДС.
Протокол № 1 от 15 сентября 2016 г.

Рецензент – канд. техн. наук, доцент Чернышев О.Н.

Редактор Е.Л. Михайлова
Оператор компьютерной верстки Е.А. Газеева

Подписано в печать 20.04.18		Поз. 56
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 2,56	Цена

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия являются обязательной составной частью изучения специальных дисциплин, поскольку они позволяют не только закрепить изучаемый теоретический материал дисциплины, но и привить навыки в проведении экспериментальных исследований. В процессе проведения лабораторных работ обучающийся не только подтверждает расчетные положения, заложенные при проектировании соединений и конструкций, но также осмысливает результаты эксперимента, делает анализ и выводы по достоверности расчетных предпосылок. Участие обучающегося в проведении эксперимента способствует более глубокому пониманию действительной работы материала, соединений и конструкции и тем самым позволяет детально оценить их фактическую конструкционную надежность.

Однако в зависимости от количества аудиторных занятий, отводимых на изучение курса, обучающиеся выполняют лишь часть из предлагаемых работ. Перечень необходимых лабораторных работ определяет ведущий преподаватель исходя из материальных возможностей кафедры и степени усвоения обучающимися тех или иных разделов курса.

Настоящее учебно-методическое пособие включает описание нескольких лабораторных работ, охватывающих основные наиболее важные разделы курса, а также методику их проведения.

По результатам проведенных лабораторных работ обучающиеся должны составить отчеты. Выполненные и оформленные лабораторные работы подлежат защите до выполнения следующей работы.

Активность обучающихся при выполнении лабораторных работ оценивается соответствующим баллом по рейтингу оценки знаний. Поэтому обучающийся заинтересован как в проявлении своей любознательности непосредственно при проведении лабораторных работ, так и в своевременной защите отчета по каждой работе.

I. СТРУКТУРА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Постановка эксперимента и обработка результатов

1.1. Цели эксперимента

Важным этапом при проектировании и изготовлении конструкций из дерева является их испытание. Несмотря на то, что любая из этих конструкций проходит стадию проектирования и всестороннего теоретического обоснования в соответствии с общепринятыми расчетами, полное представление о несущей способности деревянной конструкции может быть получено лишь из результатов испытания ее до разрушения.

Чтобы ответить на вопрос, имеет ли конструкция, показавшая при испытании разрушающую нагрузку $P_{\text{разр}}$, достаточную несущую способность,

нужно предварительно установить необходимый для этого коэффициент безопасности k . Отличительной особенностью испытаний деревянных конструкций кратковременной нагрузкой является завышенная величина полученной при этом разрушающей нагрузки и, как следствие, достаточно большой коэффициент безопасности – результат неизбежного влияния времени действия нагрузки на прочность древесины. Расчетная несущая способность конструкции, подсчитанная в соответствии с общепринятыми нормами проектирования, представляет собой длительную несущую способность, которой теоретически она должна обладать в конце периода своей службы. Кроме того, фактическая несущая способность конструкции, изготовленной по проекту, имеет отклонения от теоретической (расчетной) величины вследствие колебаний качества материала, неточностей изготовления и неполного соответствия расчетных предпосылок действительной работе такой конструкции. Наличие всех этих факторов и учитывается в коэффициенте безопасности k . Однако в ряде случаев целесообразно выделить временную и вероятностную часть коэффициента безопасности, что и следует учитывать в процессе выполнения лабораторных работ по курсу «Технология клееных деревянных конструкций».

При проведении испытаний деревянных конструкций необходимо иметь в виду, что превышение коэффициента безопасности k над единицей еще не свидетельствует о достаточной несущей способности этих конструкций или о достаточном качестве изделия.

Инженер-испытатель должен знать сущность коэффициента безопасности k , понимать его смысл и значимость в процессе оценки качества строительных конструкций.

Первоначальные навыки и представления о проведении испытания деревянных конструкций, об оценке их несущей способности и жесткости обучающиеся получают в процессе проведения лабораторных работ.

1.2. Обработка экспериментальных данных и оформление отчета

Методика проведения эксперимента, как и ход выполнения всей работы, приводится в описании к работе. Далее приводятся наиболее общие вопросы проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных, которые обучающийся должен освоить до начала выполнения конкретных лабораторных работ. К таким общим вопросам следует отнести умение пользоваться измерительными приборами, правильно оценивать их показания, грамотно вести записи в журнале испытания, приобретать навыки в обработке журнальных записей и др.

Для большинства работ измерения фактических деформаций, прогибов, сдвигов осуществляются с помощью тензометров, прогибомеров и индикаторов часового типа.

Индикаторы применяются как для измерения прогибов, так и для измерения деформации сдвига, смятия. Это очень простой механический прибор с точностью измерения 0,01 мм. Он имеет большую и маленькую стрелки и соответствующие им две шкалы на циферблате. Малая шкала разбита на 10 делений, каждое из которых соответствует 1 мм. Отсюда полный рабочий ход прибора составляет 10 мм (1 см). Большая шкала разбита на 100 делений, каждое из которых соответствует 0,01 мм. Один оборот большой стрелки составляет 1 мм. Установка стрелки индикатора производится в зависимости от направления измеряемых деформаций. Если деформации направлены от прибора, то стрелка должна быть установлена на некоторую величину отсчета, так как отсчеты будут уменьшаться. При измерении деформаций, направленных к прибору, стрелка устанавливается близко к нулю, так как отсчеты будут увеличиваться.

Величина измеряемой деформации, мм, по индикатору будет подсчитываться как

$$\Delta = (n_1 - n_0)0,01, \quad (1)$$

где n_1 – отсчет по прибору после приложения ступени нагружения;

n_0 – нулевой (или предыдущий) отсчет по прибору.

Аналогичным образом работает и прогибомер (Максимова или Аистова), только у него нет ограничения «рабочего хода». Хотя у прогибомера имеется три стрелки с соответствующими шкалами, измеряющими «см», «мм», «0,01», он позволяет осуществлять измерения неограниченных величин перемещений или прогибов. Фактическая измеряемая по прибору величина подсчитывается по формуле (1).

Для измерения деформаций чаще всего используют проволочные датчики сопротивления и электронные измерители деформаций. С помощью этих приборов измеряется относительная деформация ε . Переход от деформаций ε к напряжениям осуществляется по формуле

$$\sigma = E\varepsilon = E(n_1 - n_0)k = 10^5 (n_1 - n_0)10^5 = n_1 - n_0 = \Delta n \left(\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right) = 0,1\Delta n (\text{МПа}), \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала (для древесины по СНиП II-25-80)

$$E = 10^4 \text{ МПа} = 10^5 \text{ кгс/см}^2;$$

ε – относительная деформация;

n_1 – отсчет по прибору после приложения нагрузки;

n_0 – предыдущий отсчет по прибору;

n – разность отсчета по приборам.

Если для измерения деформаций используются тензометры (Гугенбергера или Аистова) с базой измерения B , то переход от деформации к напряжениям выражается формулой

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{n_1 - n_0}{B} m, \quad (3)$$

где n_1 и n_0 – отсчетные величины по приборам;
 m – цена деления по прибору ($m = 0,001$ мм);
 B – база прибора (тензометра).

При величине базы прибора $B = 20$ мм и модулю упругости для древесины $E = 10^4$ МПа = 10^5 кгс/см² формула (3) примет вид

$$\sigma = 15^5 \frac{n_1 - n_0}{20} 0,01 = 5(n_1 - n_0) = 5\Delta n \left(\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right) = 0,5\Delta n (\text{МПа}). \quad (4)$$

Испытания образцов производят либо в прессе, либо в испытательной машине, снабженной силоизмерителем. Нагрузка прикладывается ступенями. Величина ступени нагружения должна составлять $P = (0,1 - 0,2) P_{\text{расч}}$ ($P_{\text{расч}}$ – расчетная величина нагрузки).

Снятие отсчетов по приборам на каждом этапе нагружения должно производиться в одинаково установленной последовательности. Результаты испытания по снятым отсчетам по приборам заносят в журнал испытания. Все необходимые расчеты, записи, построение графиков выполняют в процессе проведения лабораторных работ.

После окончания экспериментальной части и обработки результатов испытания составляют заключение по проведенному эксперименту, в котором дают сравнение значений величин несущих способностей и деформаций, определенных опытным путем, с величинами, полученными в теоретических расчетах, анализируют причины отклонений между ними, подсчитывают коэффициенты безопасности, выясняют характер разрушения и строят графики деформаций.

В отчетах представляют аккуратно оформленные эскизы испытанных образцов с указанием всех необходимых размеров, схемы нагружения и расстановки приборов, разрушения образца, необходимые расчеты, обработку и анализ экспериментальных данных, выводы. Желательна самостоятельная оценка обучающимися полученных результатов исследования на основе ранее накопленных знаний и путем сравнения их с имеющимися в специальной литературе примерами.

При выполнении этой части работы необходимо особо акцентировать внимание на наличии или отсутствии пороков в древесине образца (сучков, косослоя, трещин и др.), влажности древесины и т.д. Все расчеты, записи в журналах, построение графиков по данным испытания должны по возможности производиться в процессе выполнения лабораторной работы во время аудиторного занятия.

2. Методика проведения лабораторных работ

2.1. Основные этапы проведения лабораторных работ

При проведении любых испытаний, несмотря на особенности каждого эксперимента, можно выделить повторяющиеся этапы:

- подготовительная работа;
- тарировка приборов и подготовка образцов к испытаниям;
- отработка способов нагружения;
- проведение испытаний и измерений;
- обработка и анализ результатов испытаний;
- составление выводов по испытаниям.

Фактические размеры образцов устанавливаются обучающимися на основе натуральных замеров, которые выполняются ими до начала испытания и заносятся в журнал записи результатов испытаний. Размеры образца определяют при помощи штангенциркуля с точностью до 0,1 мм.

Перед установкой испытываемого образца на опоры производят тщательный его осмотр с целью выяснения точности изготовления и оценки качества материала, поскольку именно эти факторы, как правило, являются определяющими причинами разрушения этого образца.

Теоретические величины несущей способности, разрушающей нагрузки, деформаций вычисляют до испытаний.

Нагружение образца в процессе проведения испытаний должно осуществляться таким образом, чтобы величина нагрузки на образец на протяжении времени испытания была известна на любой стадии нагружения, а рост нагрузки изменялся с постоянной скоростью и ступени этой нагрузки выдерживались неизменными в течение заданного времени.

Как правило, нагружение образца производится ступенями (одинаковой величины). После каждой ступени загрузки снимаются отсчеты по приборам. Скорость нагружения при проведении испытаний указана в описании к каждой лабораторной работе.

Фактические деформации, прогибы и сдвиги измеряют с помощью *тензометров, прогибомеров и индикаторов* часового типа. Процесс перехода от деформаций к напряжениям выражают формулами (2) и (3).

В лабораторных работах могут быть использованы и другие измерители деформаций, например, проволочные датчики сопротивления, электронные измерители деформаций, прогибомеры Максимова, Аистова и др.

По завершении лабораторной работы обучающиеся оформляют отчет согласно требованиям, изложенным в подразделе 1.2.

Выполняется самостоятельная оценка обучающимися полученных результатов исследования на основе ранее накопленных знаний и путем сравнения их с имеющимися в специальной литературе примерами.

2.2. Применение компьютерной техники при проведении лабораторных работ

Сегодня трудно переоценить значение компьютерной техники в учебном процессе. Если ценность ее в проведении расчетных работ и в графопостроении общеизвестна и практически компьютерное проектирование по известным программным материалам доминирует в строительной практике, то проведение лабораторных работ, связанных с испытанием моделей строительных конструкций, требует специальных программ, включающих мультимедийные заставки. Использование мультимедиа позволяет обучающимся наглядно увидеть с экрана монитора характер напряженно-деформированного состояния, его изменение в зависимости от величины прикладываемой нагрузки, характер разрушения и другие особенности работы испытываемого образца.

Подобная компьютерная поддержка может быть разработана практически для каждой работы, представленной в данном методическом пособии. Очень важно, чтобы разрабатываемая программа включала мультимедийную часть, показывающую ход испытания как бы в движении, с изменением напряженно-деформированного состояния образца, и мультимедиа отражала особенности работы элементов испытываемого образца.

При достаточной подготовленности обучающихся в части применения и использования компьютерной техники эту работу можно поручить им самим при методическом руководстве преподавателя. Выполнение такой работы дает обучающемуся высший балл по рейтингу для получения зачета.

Отчет по каждой лабораторной работе оформляется в тетради и содержит:

- 1) название работы;
- 2) цель работы;
- 3) описание методики эксперимента с представлением аккуратно оформленных в карандаше рисунков, схем нагружения, графиков, образцов и характеров разрушения;
- 4) результаты эксперимента, представленные в табличной и графической формах;
- 5) анализ результатов и выводы;
- 6) собственную оценку полученных результатов на основе сравнения экспериментальных данных с теоретическими.

Лабораторная работа № 1

ВВЕДЕНИЕ

Склеивание древесины – один из важных и сложных процессов в деревообработке.

В настоящее время наиболее широко применяются синтетические клеящие вещества: поликонденсационные и полимеризационные смолы. Их использование обусловлено возможностями получения прочных и долговечных клеевых соединений, технологичностью производства и применения клеев, доступностью исходного сырья.

Клееная и клеепрессованная продукция на основе древесины – это фанера и древесно-стружечные плиты, древесно-слоистые пластики и гнuto-клееные изделия из шпона, клееные деревянные конструкции для строительства и др. Качество и эксплуатационная надежность этих материалов зависит прежде всего от свойств клеев и технологических условий склеивания.

1. Общие указания

Все клеевые соединения подразделяются на два основных вида:

- 1) поперечные;
- 2) продольные.

Все соединения характеризуются повышенной прочностью, причем места склеивания при соблюдении технологии изготовления, как правило, имеют большую прочность, чем сама древесина. По этой причине расчет на прочность проводят как для монолитных деревянных элементов. Несомненным достоинством клеевых соединений является то, что из маломерных и зачастую ненужных деревянных досок можно получить прочное и достаточно габаритное деревянное изделие как по длине, так и по ширине. Причем их конфигурация может принимать различные геометрические формы и сечения, начиная от плоской детали и кончая изогнутой заготовкой переменного сечения.

Поперечные клеевые соединения

К этому виду соединений относятся изделия, которые склеены одним из следующих способов (рис.1):

- по пластям;
- по кромке;
- по пласти и кромке.



Рис. 1. Поперечные клеевые соединения

Способ склеивания по пластиам применяется для изготовления сборных деталей высотой, равной сумме всех высот клееных досок. Этим способом могут получаться как прямолинейные, так и криволинейные изделия например деревянные балки для перекрытия в бане. Клееные детали по кромкам представляют собой заготовки, которые получают путем склеивания нескольких элементов, расположенных в одной плоскости. Примером такого соединения может служить столешница или широкая доска для лавки. Соединение одной доски по пласти, а другой по кромке называется клеевым соединением по кромке и пласти, пример соединения – в виде тавра, двутавра и швеллера.

2. Раскрой пиломатериалов

На операции первого поперечного раскроя досок выявляются потери древесины, возникающие вследствие выпилки дефектных зон и получаемых при этом опилок. Припуск по длине заготовок в условиях данной конкретной задачи не учитывается, так как отрезки в дальнейшем сращиваются по длине. Категории качества заготовок для клееных несущих конструкций определяются по совокупности пороков и дефектов. Нормативный выход заготовок каждой категории качества из пиломатериалов определенного сорта может быть установлен в процессе опытных распиловок. Так как справочно-нормативных рекомендаций на этот счет не имеется, то в расчетах можно принять условные показатели, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Средние нормативные показатели выхода заготовок для производства клееных балок при поперечном раскрое сосновых досок

Сорт досок	Толщина, мм	Выход заготовок по категории качества, %*		
		I	II	III
I	19	75	90	97
	25	75	85	95
	32	70	80	90
II-III	19	67	77	90
	25	65	75	87
	32	55	70	82
IV	19	52	65	71
	25	50	65	74
	32	48	60	75

* Заготовки произвольной длины (минимальная длина – 400 мм), получаемые в процессе последовательной вырезки недопустимых пороков и дефектов.

Если при поперечном раскрое досок получают кратные заготовки, которые предназначены, например, для изготовления клееных щитов относительно небольших размеров, то следует руководствоваться нормативными припусками H_d по длине (табл. 2).

Таблица 2

Припуски по длине деталей (реек) клееного щита

Длина щита, мм	Ширина щита, мм	Припуск по длине H_d , мм
До 800	До 300	20
	300-600	25
	600-800	30
801-1600	До 400	25
	Более 400	30
1601-2400	До 800	30
	Более 800	35

Средневзвешенный выход (расчетный) заготовок из досок $S = 32$ мм рассчитывается по формуле

$$K_1 = \frac{b_1 q_1 + b_2 q_2 + b_3 q_3}{100}, \quad (5)$$

где K_1 – выход заготовок, которые соответствуют установленным требованиям к качеству, %;

b_1, b_2, b_3 – доля заготовок I, II и III категорий качества по принятому для конструкции распределению (см. рис. 2), %;

q_1, q_2, q_3 – нормативный выход заготовок I, II и III категорий качества из пиломатериалов определенного сорта.

Пример расчета:

$$K_1 = \frac{20 \cdot 55_1 + 15 \cdot 70 + 65 \cdot 82}{10000} = 73,8 \%$$

Коэффициент выхода $K_1 = 0,738$.

Схема распределения заготовок по категориям качества в объеме балки прямоугольного сечения представлена на рис. 2.

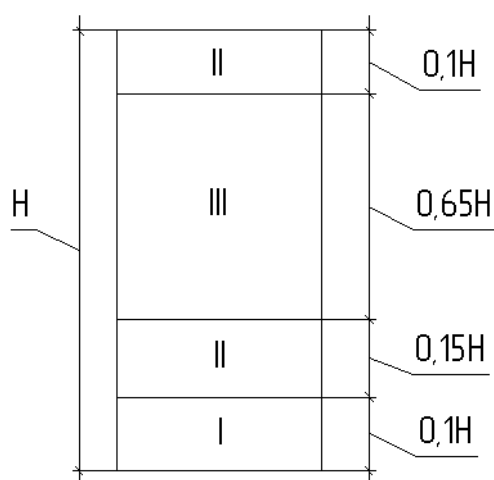


Рис. 2. Соотношение заготовок I, II III и категорий качества в объеме балки прямоугольного сечения

Распределение заготовок:

I категория качества – 20 %;

II категория – 15 %;

III категория – 65 %

3. Технология склеивания деревянных деталей

3.1. Порядок расположения склеиваемых заготовок

Для склеивания деревянных деталей применяются малогабаритные доски как по длине, так и по ширине. Их толщина не должна превышать 50 мм, а ширина – 180 мм. Перед склеиванием доски должны быть высушены до влажности не более 10–12 %, из них должны быть удалены все сквозные сучки и видимые поверхностные дефекты. Наличие вышеуказанных параметров может привести к короблению клееного соединения и, как следствие, невозможности применения его по назначению.

Перед поперечным склеиванием древесины также важно правильно выполнить ориентацию досок относительно расположения годичных слоев и направления волокон древесины. Так, при склеивании досок по кромкам фугованные смежные заготовки располагают по плоскости стыка – заболонь к заболони (наружные слои древесины) и сердцевина к сердцевине, а при склеивании по пластикам годичные слои на кромках смежных досок должны быть ориентированы в противоположные стороны.

Выполнение этих условий позволит исключить коробление клееного соединения.

3.2. Порядок выполнения работ при склеивании древесины

1. Сушка древесины до влажности не более 10–12 %.
2. Распиловка досок на требуемые размеры, фугование по поверхностям склеивания с целью обеспечения их плотного примыкания.
3. Удаление сучков и устранение дефектов.
4. Сборка досок в пакеты с необходимой ориентацией по заболони и годичным слоям в зависимости от вида клееного соединения.
5. Разборка пакетов и, если будет делаться продольное склеивание, вырезание выбранных стыков.
6. Нанесение клея на стыкуемые поверхности и выполнение других операций согласно инструкции на клей.
7. Выдержка заготовок в течение требуемого времени.
8. Соединение склеиваемых элементов друг с другом – элементы плотно зажимаются струбцинами или другим прижимным приспособлением.
9. Выдержка соединения в течение определенного времени в сжатом состоянии в соответствии с требованиями к выбранному клею.
10. Снятие с пресса клееной заготовки и выдержка ее не менее 24 ч.
11. Обработка стыков склеивания и, если требуется, дальнейшая обработка готового клееного соединения.

Полученные клеевые соединения в зависимости от области применения и климатических условий использования должны относиться к группам нагрузки, указанным в табл. 3.

Таблица 3

Описание группы нагрузки

Группа нагрузки	Примеры климатических условий и областей применения
D1	Помещения, где температура только случайно или кратковременно может превысить 50 °С и влажность древесины максимум 15 %
D2	Внутренние помещения с кратковременным воздействием текущей воды или конденсата и /или кратковременным воздействием высокой влажности воздуха с повышением влажности древесины до 18 %
D3	Внутренние помещения с кратковременным воздействием текущей воды или конденсата и/или кратковременным воздействием высокой влажности. Наружные помещения, защищенные от климатических воздействий
D4	Внутренние помещения с частым сильным воздействием текущей воды или конденсата. Наружные помещения, подвергающиеся воздействию атмосферных осадков, но имеющие определенную защиту поверхности

Подготовка строганых деталей из древесины одной породы и склеивание их между собой в двухслойный блок

– нанести кистью или шпателем клей на соединяемые поверхности деталей из расчета 150–200 г/м² и дать открытую выдержку в 5–8 мин;

– соединить детали между собой и зажать в прессе или вайме под давлением не менее 0,5 МПа;

– обеспечить выдержку блока в зажатом состоянии на режимный период склеивания (в соответствии с рекомендацией по соединению древесины клеями на основе ПВА-дисперсии).

При изготовлении клееных конструкций широко применяется водостойкая строительная фанера, склеенная из шпона, толщиной до 3 мм и шириной от 1,5 до 2 м. Инструкция (ИСП-101-51) и п. 127 НнТУ-122-55 предусматривают применение двух марок фанеры – водостойкой (ФСФ) и средней водостойкости (ФК). Водостойкая фанера (на фенолоформальдегидном клее) применяется для несущих конструкций – балок, арок, рам и т. д. – в открытых сооружениях с окраской их поверхностей и в помещениях с влажностью не выше 70 %; для кровельных щитов с гидроизоляцией и для стен и других наружных частей здания с окраской поверхностей. Фанера средней водостойкости (на карбамидных, альбумино-казеиновых и других клеях с антисептиком) используется для несущих конструкций в помещениях с влажностью воздуха не выше нормальной с окраской и для инвентарной опалубки. Клеенофанерные балки состоят из фанерных стенок и дощатых поясов (рис. 3).

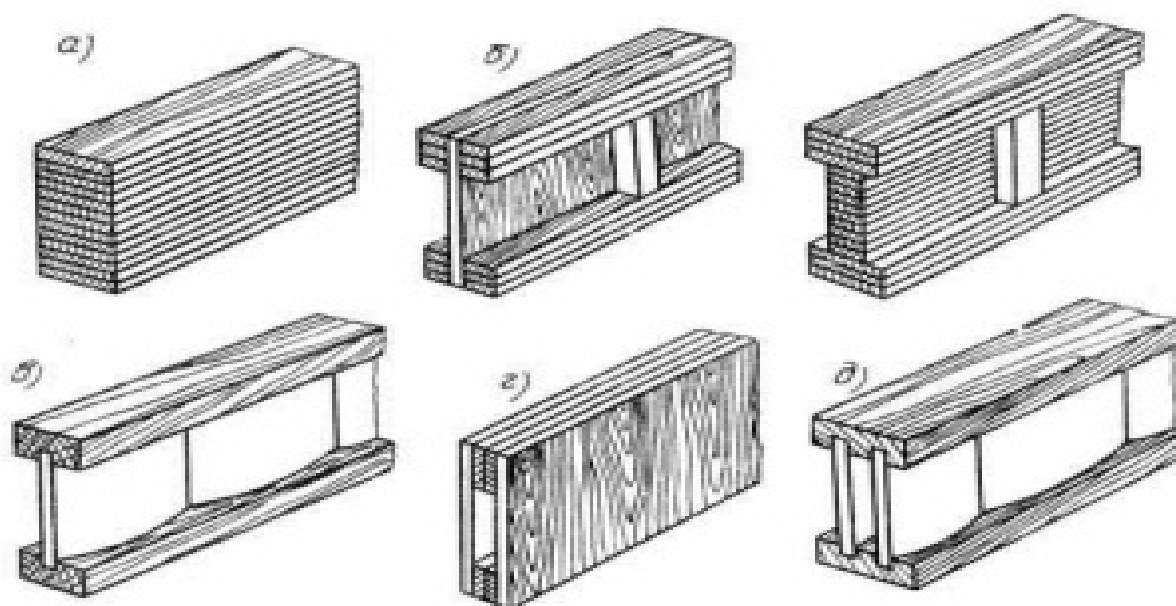


Рис. 3. Сечения клееных деревянных балок:

- а) сплошное прямоугольное; б) двутавровое с клееной фанерой и клееными деревянными стенками; в) двутавровое с волнистой стенкой; г) коробчатое; д) коробчатое с двумя стенками

Поперечное сечение клеенофанерной балки может быть двутавровым и коробчатым. Так как при этом пояса балки удалены от нейтральной оси, то материал в таких балках используется более эффективно. При этом клеенофанерные балки могут быть постоянной высоты, двускатными, а также с криволинейным верхним поясом.

Балки с плоской фанерной стенкой рекомендуется использовать для пролетов до 15 м. Их высоту назначают в пределах $1/18$ — $1/12$ длины пролета. Толщина стенок должна быть не менее 8 мм. Доски поясов балки могут располагаться как горизонтально, так и вертикально. Пояса балки по плоскостям склеивания с фанерными стенками должны иметь прорезы для того, чтобы ширина клеевых швов не превосходила 10 см. Это предотвратит появление перенапряжения швов при колебаниях температуры и влажности.

Придание жесткости фанерной стенке обеспечивается установкой дощатых ребер жесткости, которые располагают в коробчатых балках в полости между двумя фанерными стенками. В двутавровых балках ребра жесткости располагают по обе стороны стенки. По длине ребра жесткости ставятся с шагом, равным $1/8$ — $1/10$ пролета.

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ КЛЕЕНОЙ ДЕРЕВЯННОЙ БАЛКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ

Цель работы: изучение работы клееной балки.

На рис.1 представлена схема установления размеров клееной балки прямоугольного дощатого сечения, на рис. 2 – схема нагружения балки и расстановки приборов.

Задачи: определить нагрузку на балку и сравнить ее с расчетной, определить модуль упругости клееной древесины (см. Приложение табл. 3), определить величины и характер распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки, построить теоретический и экспериментальный графики прогибов балки. Определить расчетную нагрузку P^T , при которой клееная балка достигает предельного состояния, и произвести подсчет прогиба балки при условной нормативной нагрузке P^H

$$P^H = \frac{P^T}{1,2}, \quad (1)$$

где $1,2$ – условный коэффициент надежности по нагрузке; выявить зависимость прогиба f балки от нагрузки P и подсчитать фактическую величину модуля упругости древесины балки; установить характер распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки и сравнить его с теоретическим; определить разрушающую нагрузку $P_{разр}$ для балки и подсчитать коэффициент безопасности по формуле

$$K = \frac{P_{разр}}{P_{кр}^T}. \quad (2)$$

1. Установление фактических размеров образца

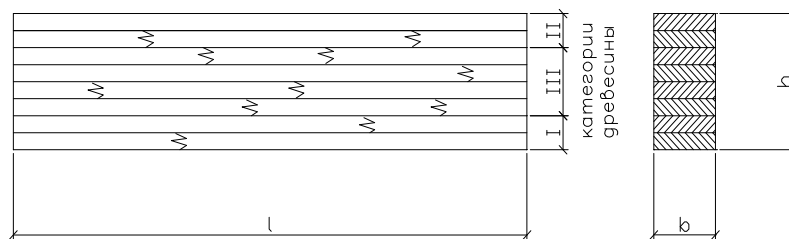


Рис.1. Клееная балка прямоугольного поперечного сечения

Исходные данные: $l = 1950$ мм; $h = 158$ мм; $b = 50$ мм.

2. Схема нагружения образца и расстановка приборов

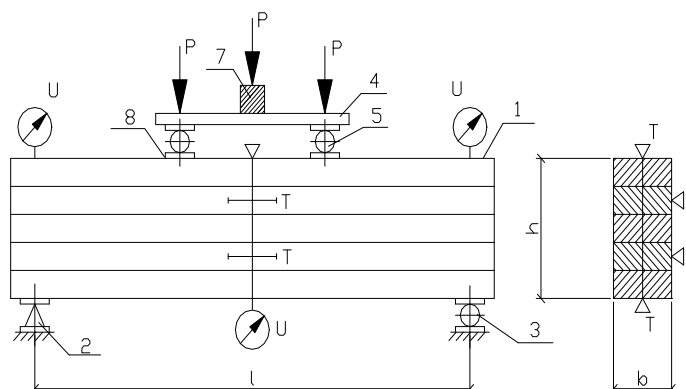


Рис. 2. Схема нагружения балки и расстановки приборов:
 1 – клеudoшатая балка; 2 – неподвижная опора; 3 – подвижная опора;
 4 – распределительная траверса; 5 – стальной валик;
 6 – металлическая накладка; 7 – нагруженная траверса

3. Определение расчетной нагрузки на балку

Расчетная нагрузка P определяется исходя из расчетной несущей способности балки или достижения ею предельного прогиба:

а) из условия обеспечения прочности от действия нормальных напряжений

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_u, \quad (3)$$

где $M = \frac{pl}{6} = 8,32 \frac{1,95}{6} = 2,70$ кН·м – расчетный изгибающий момент,

$$W = \frac{bh^2}{6} = 0,05 \frac{0,158^2}{6} = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3 \text{ – момент сопротивления}$$

поперечного сечения;

R_u – расчетное сопротивление древесины изгибу, МПа ($\frac{\text{кГС}}{\text{см}^2}$)

($R_u = 13$ МПа, приложение, табл. 1)

$$R = \frac{R_u bh^2}{l} = \frac{13 \cdot 10^6 \cdot 0,05 \cdot 0,158^2}{1,95} = 8,32 \text{ кН;}$$

б) из условия обеспечения прочности клеевого шва от действия касательных напряжений

$$\tau = \frac{QS_{\bar{b}p}}{I_{\bar{b}p} b_{расч}} \leq R_{\phi.ск}, \text{ где } R_{\phi.ск} = 0,8 \text{ МПа,}$$

где $Q = P/2 = 13,27/2 = 6,64$, Н (кгс);

$$S_{\bar{b}p} = bh^2/8 = 0,05 \cdot 0,158^2/8 = 156,03 \text{ см}^3;$$

$$J_{\bar{b}p} = bh^3/12 = 515,8^3/12 = 1643,46 \text{ см}^4;$$

$b_{расч} = bK$ – при расчете на скалывание по клеевому шву,

где $K = 0,6$ – коэффициент непрочности, принимаемый по действующим нормам.

После подстановки получим:

$$b_{расч} = bK = 0,6 \cdot 5 = 3 \text{ см};$$

$$R_{ск} = 2,1 \text{ МПа};$$

$$P = \frac{R_{ск} 4hb_{расч}}{3} = \frac{2,1 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 0,158 \cdot 0,03}{3} = 13,27 \text{ кН};$$

в) из условия достижения предельного прогиба

$$f = \frac{P^n}{2} = \frac{l^3}{28,17EI} \leq f_{np} = \frac{l}{300},$$

$$f = \frac{8,08 \cdot 10^3 \cdot 1,95}{2 \cdot 28,17 \cdot 10^4 \cdot 1,64 \cdot 10^{-5}} = 0,17 < f_{np} = \frac{195}{300} = 0,65,$$

где $P^n = P/n$ ($n = 1,2$ – усредненный коэффициент надежности);

$E = 10^4$ МПа – модуль упругости древесины (приложение, табл. 2).

После преобразования получаем:

$$P = \frac{0,225EI}{l^2} = \frac{0,225 \cdot 10000 \cdot 10^6 \cdot 1,64 \cdot 10^{-5}}{1,95^2} = 9,7 \text{ кН,}$$

$$\text{где } I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,05 \cdot 0,158^3}{12} = 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ см}^4,$$

$$P_{\min} = 8,32 \text{ кН, } K_{\partial n} = 0,67,$$

$$P = \frac{P_{\min}}{K_{\partial n}} = \frac{8,32}{0,67} = 12,43 \text{ кН.}$$

ИСПЫТАНИЕ БАЛКИ

Данные измерений заносятся в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Данные измерений прогибомеров на этапах нагружения балки

Этап нагружения	Нагрузки Р, кН	Прогибомеры						Средняя величина приращения отсчётов $\Delta C_{cp} = \frac{\Delta C_1 + \Delta C_2}{2}$	Разность приращения отсчётов $\Delta = \Delta C_2 - \Delta C_{cp}$	Полный прогиб балки $f = \sum \Delta K_i$
		П-1		П-2		П-3				
		Отчет С ₁	Разность отсчетов ΔC_1	Отсчёт С ₂	Разность отсчётов ΔC_2	Отсчёт С ₃	Разность отсчётов ΔC_3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0										
1										
2										

Ниже приведен пример расчетов прогиба балки.

Журнал определения прогиба балки

Пример

№ этапа загрузки	Нагрузка Р, кН	Отсчет по индикатору						Прогиб $f_{эксп}$	Примечание
		И1		И2		И3			
		С1	ΔC_1	С2	ΔC_2	С3	ΔC_3		
1	0	300		304		100		0,00	
2	3	290	010	269	035	023	310	210	1,87
3	6	283	017	247	057	037	530	430	3,63
4	9	276	024	237	067	046	763	663	6,17

$$f = \Delta c_3 - \frac{\Delta c_1 + \Delta c_2}{2} = 663 - \left(\frac{0,67 + 0,46}{2} \right) \frac{1}{100} = 6,17 \text{ мм.}$$

Таблица 2

Данные измерений тензодатчиков на этапах нагружения балок

Этап нагружения	Нагрузка Р, кН	Тензодатчики										
		Т-1		Т-2		Т-3		Т-4		Т-5		
		Отсчет С ₁	Разность отсчетов ΔС ₁	Отсчет С ₂	Разность отсчетов ΔС ₂	Отсчет С ₃	Разность отсчетов ΔС ₃	Отсчет С ₄	Разность отсчетов ΔС ₄	Отсчет С ₅	Разность отсчетов ΔС ₅	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0												
1												
2												

Ниже приведен пример расчетов напряжения балки.

Журнал определения напряжения балки

№ этапа нагружения	Нагрузка Р, кН	Тензорезисторы								МПа	МПа	МПа	МПа	Примечание
		Т1		Т2		Т3		Т4						
		С1	ΔС1	С2	ΔС2	С3	ΔС3	С4	ΔС4					
1	0	5380		5420		5339		5441		14,41	9,37	4,80	12,49	
2	9	5260	120	5327	075	5380	041	5545	104					
3	0	5380	120	5407	080	5342	038	5441	104					
4			120		078		040		104					

Прибор: АИД – 2М с компенсирующим устройством с выходом шкалы $C \cdot 10^{-5}$.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

$$E = \frac{pl^2}{28,17If} = \frac{9 \cdot 10^3 \cdot 195^2}{28,17 \cdot 1643,5 \cdot 0,168} = 11961,27 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_1 = 120 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^4 = 14,40 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_2 = 77,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^4 = 9,37 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_3 = 39,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^4 = 4,80 \text{ МПа},$$

$$\sigma_4 = 104 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2 \cdot 10^4 = 12,49 \text{ МПа},$$

$$\sigma = \frac{MY}{I},$$

$$M = \frac{P_{\min} l}{6} = \frac{8,32 \cdot 10^3 \cdot 1,95}{6} = 2704 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$\sigma_T = 13 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{экс}} = 14,4 \text{ МПа}$$

По результатам расчетов строится эпюра напряжений по высоте сечения балки, которая представлена на рис. 3.

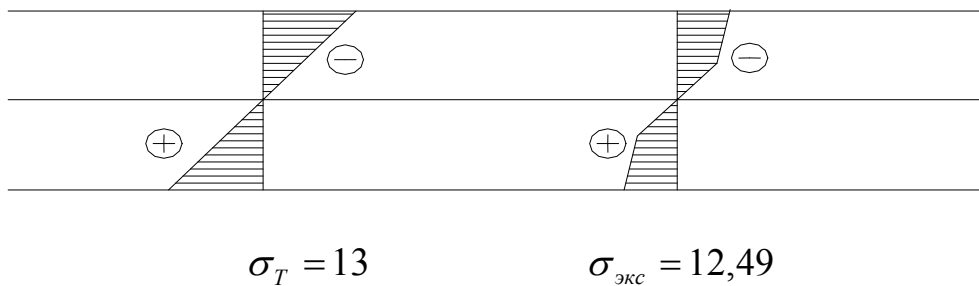


Рис. 3. Эпюра напряжений по высоте сечения балки

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

$$f_m = \frac{Pl^3}{28,17EI};$$

$$f_1 = \frac{3000 \cdot 195^3}{28,17 \cdot 10^6 \cdot 1643,46} = 0,48;$$

$$f_2 = \frac{6000 \cdot 195^3}{28,17 \cdot 10^6 \cdot 1643,46} = 0,96;$$

$$f_3 = \frac{9000 \cdot 195^3}{28,17 \cdot 10^6 \cdot 1643,46} = 1,44;$$

$$K_{\text{запаса}} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{разр}}} = \frac{9}{9,8} = 0,9.$$

По расчетам прогибов балок строят графики прогибов балок, представленные на рис. 4.

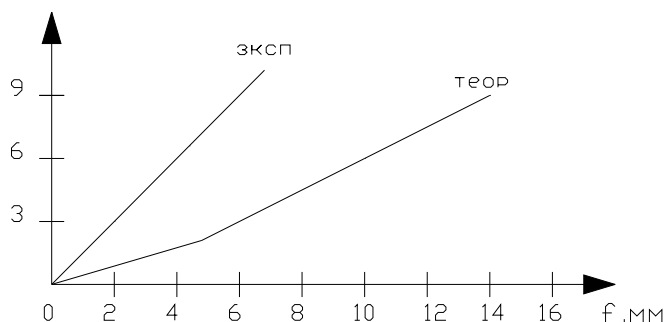


Рис. 4. Графики прогибов балки

В работе делается вывод по результатам вычислений и графикам прогибов.

ВЫВОД: экспериментальная величина прогиба значительно меньше расчетной величины, вследствие чего в рассматриваемых конструкциях создается запас прочности ($K_{\text{запаса}} = 0,9$).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое клей?
2. Назовите основные требования к клеям, применяемым в несущих строительных конструкциях?
3. Какие клеи следует применять в несущих конструкциях?
4. Что вызывает внутренние напряжения в клеевых швах?
5. Какие размеры по ширине и толщине досок рекомендуются при изготовлении клеенощитых конструкций?
6. Какая максимальная влажность древесины допускается при склеивании досок?
7. Почему ограничиваются размеры досок и влажность древесины при изготовлении клеенощитых конструкций?
8. Как определяется несущая способность двутавровой клееной балки?
9. Как определяются теоретические значения напряжений в поперечном сечении балки?
10. Для чего в лабораторной работе используется индикатор часового типа?
11. Для чего в лабораторной работе используются тензодатчики?
12. Что такое коэффициент безопасности?
13. Что такое разрушающая нагрузка?

14. Почему нагрузка на образец прикладывается в виде двух сосредоточенных сил?

15. Как определяются экспериментальные значения напряжений в поперечном сечении балки?

16. Какой метод принят для расчета деревянных конструкций, его сущность?

17. Как определить модуль упругости клееной древесины при изгибе?

18. Как экспериментально определяются нормальные напряжения в балке при изгибе?

19. Какие формы разрушения могут быть в клееной балке?

20. Почему экспериментальные данные отличаются от теоретических?

Так как древесина анизотропная и имеет пороки, а теоретические данные получены для идеализированного материала.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ БАЛКИ

Цель работы: изучить механические свойства древесины на примере модуля упругости, определяемого в опытах по колебаниям нагруженной балки.

Материалы и оборудование: линейка, штангенциркуль, устройство для закрепления образцов, набор образцов и грузов, платформа для грузов.

Виды деформаций

Под действием приложенных к нему сил всякое реальное тело **деформируется**, т. е. изменяет свои размеры и форму. Если после прекращения действия сил тело принимает первоначальные размеры и форму, то деформация называется **упругой**. Деформации, которые сохраняются в теле после прекращения действия внешних сил, называются **пластическими (остаточными)**. Деформации реального тела всегда пластические, так как они после прекращения действия внешних сил никогда полностью не исчезают. Однако если остаточные деформации малы, то ими можно пренебречь и рассматривать упругие деформации. Наиболее простые виды деформации тела в целом – это **растяжение, сжатие, сдвиг, изгиб, кручение**.

Деформация **сдвига** – это деформация, при которой происходит смещение слоёв тела друг относительно друга. Наглядно деформацию сдвига можно показать на модели твёрдого тела, которое состоит из ряда параллельных пластин, соединённых между собой пружинами. Горизонтальная сила сдвигает пластины друг относительно друга без изменения объёма тела. У реальных твёрдых тел при деформации сдвига объём также не меняется.

В теории упругости доказывается, что все виды деформаций сводятся к одновременно происходящим деформациям растяжения или сжатия и сдвига.

Древесина – анизотропный материал, для которого характерно изменение механических свойств в зависимости от выбранного направления. Поэтому следует указывать направление действия сил: вдоль или поперёк волокон.

Деформацией твёрдого тела называется изменение размеров тела под воздействием внешних сил. Для упругих деформаций справедлив **закон Гука**: величина абсолютной деформации тела, Δl , пропорциональна приложенной к нему внешней силе F :

$$F = K\Delta l, \quad (1)$$

где K – коэффициент жёсткости тела.

Абсолютной деформацией называется величина

$$\Delta l = l - l_0, \quad (2)$$

где l_0 – начальная длина тела;

l – длина тела после деформирования.

Относительной деформацией называется величина ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (3)$$

Древесина является строительным материалом, для которого в диапазоне нагрузок, возникающих при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, выполняется закон Гука.

Под действием приложенных внешних нагрузок в сечениях деревянных балок возникают внутренние силы, препятствующие их деформированию. Согласно третьему закону Ньютона величина внутренних сил равна величине приложенной внешней силы. Появление внутренних сил является причиной возникновения напряжений в сечении балки.

Механическое напряжение σ – это физическая величина, численно равная отношению величины внутренних сил к площади поперечного сечения тела, на которое эти силы действуют:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (4)$$

В случае упругой деформации закон Гука может быть записан в виде

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (5)$$

С учётом (3), (4) и (5) имеем

$$F = ES \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$

или для коэффициента жёсткости имеем

$$K = \frac{ES}{l_0}, \quad (7)$$

где E – модуль Юнга, который характеризует упругие свойства тела при деформации растяжения или сжатия.

Модуль Юнга численно равен силе, растягивающей балку единичного поперечного сечения вдвое по сравнению с первоначальной длиной.

Единицей измерения модуля Юнга является $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па} = (\text{паскаль})$.

Для большинства широко распространённых материалов модуль Юнга определён экспериментально. Чем больше модуль Юнга, тем меньше деформируется стержень при прочих равных условиях (одинаковых F , S , l). Модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала упругой деформации растяжения или сжатия.

Более сложными видами деформации являются **изгиб и кручение**. *Изгиб* – это деформация тела, сопровождающаяся изменением его кривизны под воздействием внешних сил (рис. 1). Деформацию изгиба испытывает, например, нагруженная балка. Кручение происходит при завёртывании болтов, вращении валов машин, свёрл и т. д.

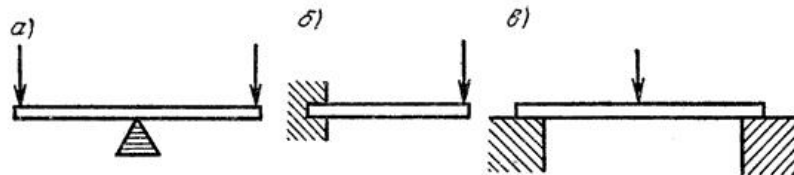


Рис. 1. Испытание механических свойств древесины на изгиб

Различают несколько видов изгибов: **чистый, поперечный, продольный, косой**. *Чистый* изгиб можно получить, если к концам балки приложить два равных по величине и противоположных по направлению момента (рис. 2, а). *Поперечный* изгиб в простейшем случае возникает у опирающейся на опоры балки и вызывается нагрузками, лежащими в плоскости, проходящей через ось балки перпендикулярно одной из боковых граней (рис. 2, б). *Продольный* изгиб возможен в случае, если на тонкую длинную вертикальную балку действует внешняя нагрузка большой величины так, как показано на рис. 2, в. Балка стремится изогнуться, при этом она теряет устойчивость. *Косой* изгиб возникает тогда, когда силы, действующие на балку, лежат в плоскости, проходящей через ось балки под углом, отличным от 90° , к боковой грани.

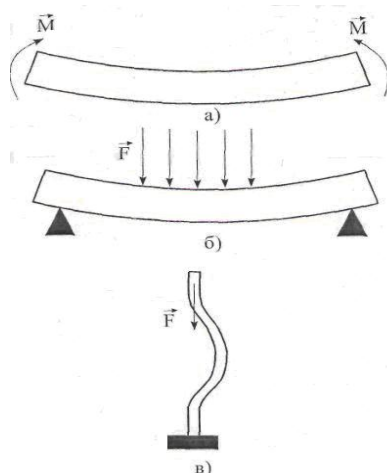


Рис. 2. Чистый (а), поперечный (б) и продольный (в) изгибы

Вывод расчётной формулы

Вычислим потенциальную энергию упруго растянутой (или сжатой) балки, которая равна работе, совершаемой внешними силами при её деформировании:

$$\Pi = A = \int_0^{\Delta l} F dx, \quad (8)$$

где F – величина внешней силы; x – абсолютное удлинение балки, изменяющееся в процессе деформации от 0 до Δl . Согласно закону Гука (7) имеем:

$$\Pi = A = \int_0^{\Delta l} \frac{ES}{l} x dx = \frac{1ES}{2l} \Delta l^2. \quad (9)$$

Если нагруженную балку, жёстко закреплённую с одного конца по схеме, представленной на рис. 2, в, отклонить от положения равновесия, то она будет совершать колебания с периодом, определяемым, как и для пружинного маятника, по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (10)$$

где m – масса нагрузки;

k – жёсткость балки.

Формула справедлива для таких упругих колебаний, в которых выполняется закон Гука, т. е. когда масса балки мала по сравнению с массой нагрузки m .

Для двух разных масс, m_1 и m_2 , нагрузки имеем:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_1}{k}}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{k}}, \quad (11)$$

тогда жёсткость балки можно определить по формуле

$$k = \frac{4\pi^2(m_1 - m_2)}{T_2^2 - T_1^2}. \quad (12)$$

Жёсткость балки зависит от её геометрических размеров, формы, способа закрепления и модуля упругости вещества балки (модуля Юнга).

Для образца (балки), закреплённого согласно схеме опыта (см. рис. 2, в) модуль Юнга будет определяться согласно формулам, представленным в [1]:

– для образцов с прямоугольным сечением:

$$E = \frac{4kl^3}{ab^3}, \quad (13)$$

– для круглых образцов:

$$E = \frac{64kl^3}{3\pi D^4}, \quad (14)$$

где K – жёсткость;

a и b – размеры поперечного сечения образца;

D – диаметр образца;

l – длина образца.

Экспериментальная часть

Испытания производятся на установке, представленной на рис.3, где на двух вертикальных стойках 1 горизонтально закреплён исследуемый образец 2. На шкале линейки 3 фиксируется прогиб образца после нагружения его вначале пустой платформой для грузов 4, а затем и грузами 5.

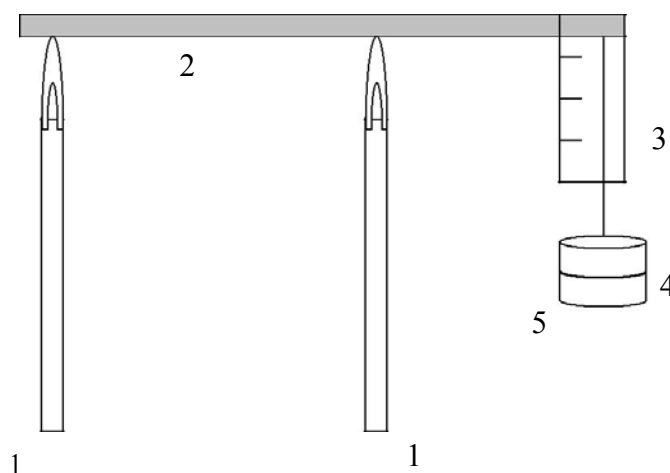


Рис. 3. Схема испытания древесины при статическом изгибе

Указания к работе

1. Перед испытанием штангенциркулем измерьте размеры образца: ширину и высоту поперечного сечения или диаметр (с точностью до 0,1 мм). Результаты этих и последующих измерений запишите в табл. 1.

2. Жёстко закрепите образец в установке за один из концов.

3. Длину образца от точки зажима на правой стойке до точки приложения нагрузки измерьте линейкой. Занесите данные в таблицу измерений.

4. К свободному концу образца подвесьте груз массой m_1 .

5. Возбудите колебания свободного конца образца, слегка нажав на него и отпустив. Измерьте время 10 колебаний t_1 . Повторите опыт три раза. Результаты измерений занесите в табл. 2.

6. К свободному концу образца подвесьте груз массой m_2 . Измерьте время 10 колебаний t_2 . Повторите опыт 3 раза. Результаты измерений занесите в табл. 2.

7. По результатам рассчитайте среднее значение времени колебаний t_{cp} и период колебаний $T = t_{cp}/N$, где N – количество колебаний образца (10). Результаты занесите в табл.2.

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}. \quad (15)$$

8. Рассчитайте жёсткость балки по формуле (12) и модуль Юнга по одной из формул (13) для образца с прямоугольным сечением или (14) для круглого в сечении образца. Результаты запишите в табл. 2.

9. Повторите опыт с другим грузом.

10. Найдите среднее значение модуля Юнга для данной породы древесины и сравните результат с величиной, представленной в табл. 3.

Таблица 1

Параметры образцов

Порода древесины	№, п/п	d_{cp} , м	a_{cp} , м	b_{cp} , м	L_{cp} , м
	1				
	2				
	3				

Таблица 2

Результаты опыта

№ п/п	m , кг	t , с			t_{cp} , с	T , с	K , Н/м	ΔE , ГПа
		1	2	3				
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Таблица 3

Справочные данные

Порода древесины	Модуль Юнга при изгибе $E \cdot 10^9, \text{Па}$	Порода древесины	Модуль Юнга при изгибе $E \cdot 10^9, \text{Па}$
Акация белая	16,3	Ольха	9,33
Берёза	14,2	Клён	11,9
Бук	12,4	Липа	8,94
Вяз	10,1	Осина	11,2
Граб	3,2	Сосна обыкновенная	12,2
Груша	11,9	Тополь	10,3
Ель	9,0-9,6	Ясень обыкновенный	11,9
Дуб	13,0	Бамбук	33,0
Ива	8,98	Лиственница	14,3

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды деформации вы знаете?
2. Что называют абсолютной и относительной деформацией, механическим напряжением?
3. Запишите закон Гука.
4. В чём состоит физический смысл модуля Юнга?
5. Как связаны между собой значение модуля Юнга и коэффициент жёсткости?
6. Запишите и поясните формулу для определения периода колебаний пружинного маятника.
7. Выведите формулу для расчёта коэффициента жёсткости балки.

Лабораторная работа № 4**МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК
ЦЕЛЬНОГО И СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ**

Цель работы: определение несущей способности и деформативности деревянных балок цельного и составного сечения при статическом поперечном изгибе.

1. Основные понятия

В изгибаемом элементе от нагрузок, действующих поперек его продольной оси, возникает изгибающий момент и поперечная сила. При этом в сечениях элемента возникают деформации и напряжения изгиба.

Изгибаемые элементы рассчитываются по несущей способности: прочности на действие изгибающего момента и поперечной силы от расчетных нагрузок и по прогибам от нормативных нагрузок. Прочность и жесткость изгибаемых элементов (балок) зависит от размеров и форм поперечных сечений, определяющих их геометрические характеристики: момент инерции I , момент сопротивления W и статический момент S . Прочность изгибаемых элементов рассчитывают по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W_p} \leq R_u, \quad (1)$$

где W_p – расчетный момент сопротивления;

M – максимальный изгибающий момент;

R_u – расчетное сопротивление древесины изгибу.

Расчет изгибаемого элемента по прогибам заключается в определении величины его наибольшего прогиба в отличие от нормативных нагрузок и в сравнении его значения с предельными допустимыми нормами проектирования, т.е.

$$\frac{f}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right]_{пред}. \quad (2)$$

Приборы и принадлежности: нагрузочное рычажное устройство; индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; штангенциркуль с точностью измерения до 0,1 мм; образцы – балки составного и цельного сечения; штатив для индикатора; грузы.

2. Подготовительные работы

Для проведения механических испытаний на статический изгиб используют балки цельного и составного сечения (рис.1, 2). Правильность и точность подготовленных к испытанию образцов проверяют угольником и измерительной линейкой.

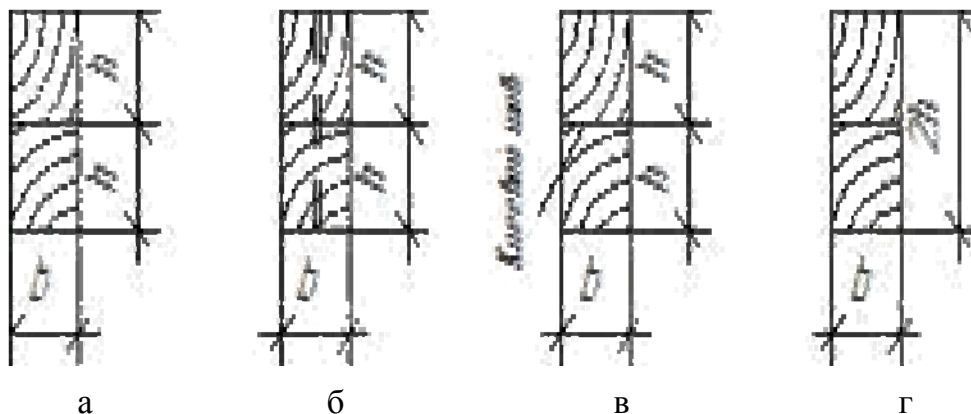


Рис. 1. Типы составных балок для испытания на изгиб:
а – без связей; б – на гвоздях; в – на клею; г – цельного сечения

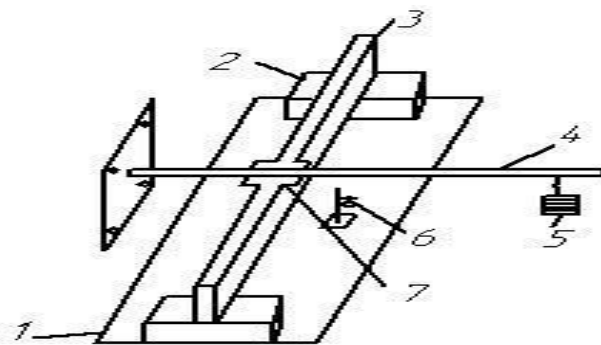


Рис. 2. Схема испытания балок на изгиб:

1 – стол; 2 – опорная подушка; 3 – испытываемая балка; 4 – рычаг; 5 – грузы;
6 – индикатор, установленный на штативе; 7 – центрируемая балка

Механические испытания балок цельного и составного сечения производят на стенде по схеме (рис. 3 а, б).

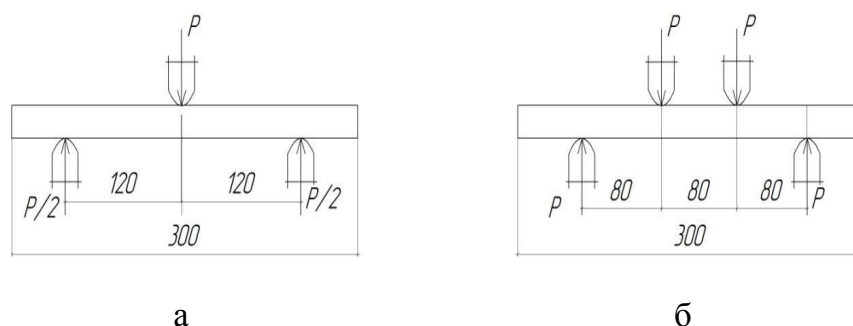


Рис. 3. Схемы испытания древесины на статический изгиб:

а – при нагружении в одной точке посередине расстояния между опорами;
б – при нагружении в двух точках на одной трети расстояния от опор

Нагрузочным устройством служит рычаг с отношением плеч 1:6, что позволяет небольшими грузами 41,6 Н создавать ступени нагружения по 250 Н. Измерение прогибов балок выполняют индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм. Испытывают четыре типа балок цельного и составного сечений. Полученные данные эксперимента сравнивают с результатами теоретического расчета.

3. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы. Механические испытания балок цельного и составного сечения проводят в два этапа.

Этап 1. К балке через рычаг прикладывают груз ступенями по 250 Н. Первой ступенью нагружения является сам рычаг, от веса которого на балку действует нагрузка 250 Н.

Нагрузку прикладывают плавно без рывков. Перед тем как начать загрузку балки, устанавливают индикатор к балке, а стрелку индикатора совмещают с нулевым делением шкалы. Перед загрузкой каждого этапа показание индикатора заносят в графу 3 таблицы.

На каждом этапе нагружения получают упругие деформации $f_{упр}$ и остаточные деформации $f_{ост}$, которые заносят соответственно в графы 6 и 7 таблицы. Полные деформации $f_{полн} = f_{упр} + f_{ост}$ заносят в графу 8 таблицы. После приложения расчетной нагрузки P определяют сумму деформаций упругих, остаточных и полных. После снятия нагрузки и подъема рычага снимают отсчет по индикатору в течение 2–3 с. Затем производят выдержку (в это время снимают грузы с рычага) до полного затухания деформаций (до 3 мин) и берут отсчет, который должен быть близким к отсчету до загрузки балки.

Таким образом испытывают четыре типа балок.

Сравнительная таблица работы цельного и составного сечения

Ступени нагружения	Величина ступени нагружения	Показания индикатора, мм			Величина прогиба $f_{упр}$, мм			Величина прогиба f , определенная теоретически, мм
		до начала ступени загрузки	после начала загрузки ступени через 2–3 с	после выдержки на данной ступени загрузки в течение 3–5 мин до прекращения роста значений	$f_{упр}$	$f_{ост}$	$f_{полн}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Этап 2. На рычаг навешивают грузы до расчетного значения силы P (с учетом веса рычага). Стрелку индикатора выводят на нулевое положение. Затем плавно опускают рычаг с полным грузом P на балку и снимают отсчет в течение 2–3 с. Результаты фиксируют в таблице ($f_{упр}$).

Эту нагрузку выдерживают до полного прекращения роста прогиба и снова снимают показание индикатора ($f = f_{упр} + f_{ост}$). Затем поднимают рычаг с грузом (балка разгружена) и в течение 2–3 с снимают отсчет, который фиксируют в таблице. После прекращения измерения прогиба (выдержка до 3 мин) снимают последний отсчет и заносят в таблицу.

Этап 2 выполняется только для балки типа (г).

4. Обработка результатов эксперимента

1. Определение величины расчетной нагрузки, приложенной в середине пролета балки.

Для балки (рис. 4) изгибающий момент определяют по формулам

$$M = WR_u, \quad (3)$$

$$M = \frac{Pl}{4}, \quad (4)$$

откуда $P = 4M/l$, где R_u – расчетное сопротивление древесины изгибу (СНиП 11-25-80); l – пролет балки; W – момент сопротивления балки типа:

а – $W_0 = bh^2/3$; б – $W_n = K_W W_0$; в, г – $W_0 = 2bh^2/3$

(K_W – коэффициент податливости связей).

2. Определение максимального прогиба по схеме рис. 4.

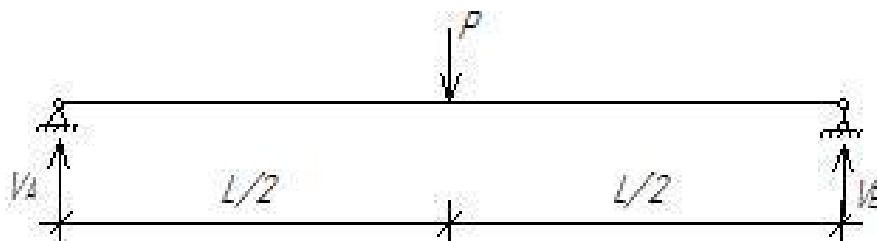


Рис. 4. Расчетная схема механических испытаний балок при статическом изгибе

Прогиб в однопролетной балке под действием сосредоточенной нагрузки P определяется по формуле

$$f = \frac{1}{48} \frac{p_0 l^3}{EI}, \quad (5)$$

где I – момент инерции сечения; E – модуль упругости материала балки (сосна); p_0 – величина ступени нагружения, принимаемая в эксперимент 250 Н ;

для балки типа а – $I_a = hh^3/6$; типа б – $I_b = I_0 k_{жс}$; типа «в», «г»: $I_0 = 2bh^3/3$ ($k_{жс}$ – коэффициент, учитывающий понижение жесткости).

Прогибы определяются отдельно для каждого типа балок.

По данным прогибов этапа 1 строится график (рис 5, а). На данном графике показывают теоретическую прямую (пунктирная линия). Подобные графики строят для всех четырех типов балок. По результатам этапа 2 строят график (рис.5, б), на котором прогиб с индексом «Н» означает прогиб при нагрузке, а с индексом «Р» – при разгрузке.

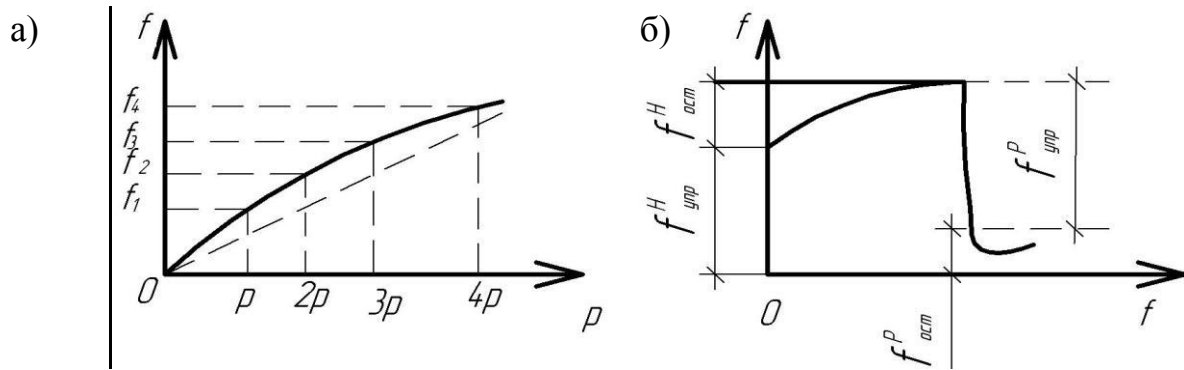


Рис. 5. Графики прогибов: а – для 1-го этапа; б – для 2-го этапа

Полученные результаты эксперимента сравнивают с теоретическими и дают анализ расхождения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как работают и рассчитываются брусчатые балки при изгибе?
2. В чем отличие составного элемента со связями на клею от элемента цельного такого же сечения?
3. Как рассчитывается изгибаемый элемент по прочности и по прогибам?

Лабораторная работа № 5

ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛИ ДВУТАВРОВОЙ КЛЕЕНОЙ БАЛКИ

Цель работы: изучить характер работы клееной деревянной балки двутаврового поперечного сечения; выявить эффективность рациональных форм поперечных сечений клееных балок путем сравнения результатов испытания балок прямоугольного (см. лабораторную работу № 3) и двутаврового поперечных сечений.

1. Эскиз и размеры образца

С целью выявления рациональности формы поперечного сечения образец (рис. 1) выполняют из таких же трех брусков, что и в лабораторной работе № 3 (только средний брусок здесь поставлен на ребро). Это позволяет более обстоятельно сравнивать работу двух балок, так как они равновелики и по объему расходуемой древесины, и по площади поперечного сечения.

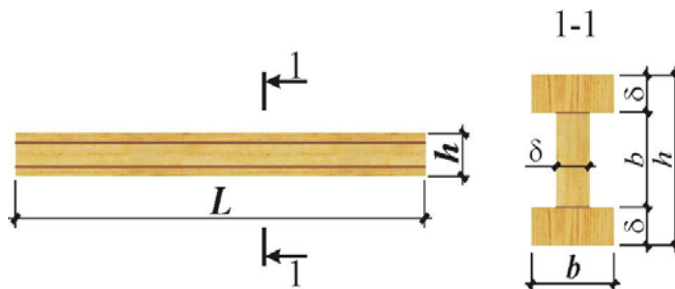


Рис. 1. Общий вид образца балки

Основные размеры балки записывают по результатам натурного обмера:

- ширина b ;
- высота h ;
- общая длина L ;
- расчетный пролет l_p ;

затем подсчитывают геометрические характеристики поперечного сечения:

площадь $A = bh$;

момент инерции $J = \frac{bh^3}{12}$;

момент сопротивления $W = \frac{bh^2}{6}$;

статический момент полусечения $S = \frac{bh^2}{8}$;

статический момент верхнего бруска $S_1 = b\delta\left(\frac{h}{2} - \frac{\delta}{2}\right)$.

2. Схемы нагружения балки и расстановки приборов

Испытание балок производят на машине ГРМ-1 с предельной нагрузкой на силоизмерителе (рис. 2), равной 100 кН (шкала А), или на универсальной машине УММ-5. В процессе испытания балки измеряют прогибы в середине пролета и деформации продольных волокон в поперечном сечении, отстоящем на расстоянии $a = l/2$ от одной из опор.

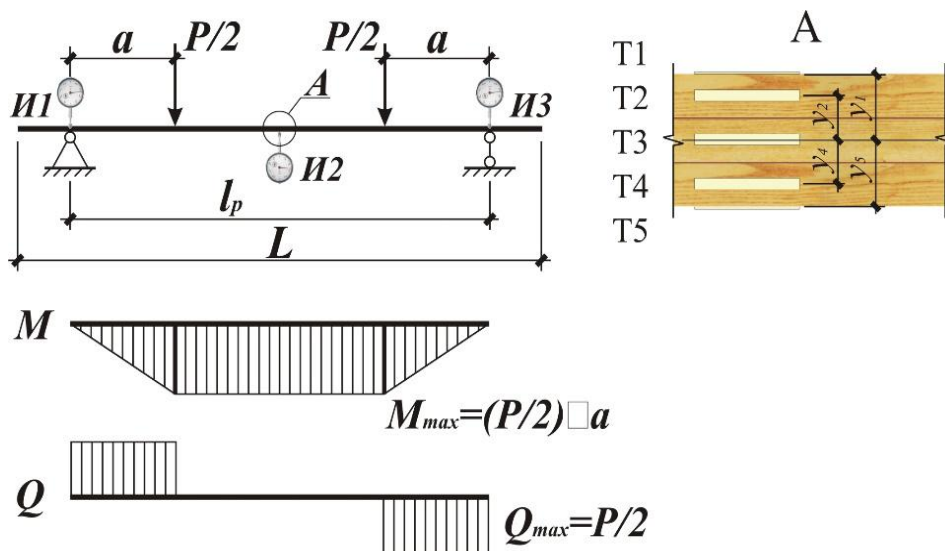


Рис. 2. Схема нагружения балки и расстановки приборов:
 А – прогибомеры; Т₁ – Т₅ – тензометры (тензодатчики)

Для измерения прогибов балки ставят три индикатора часового типа с ценой деления $K_{и} = 0,01$ мм. Осадки опор измеряют индикаторами П-1 и П-3, а прогиб балки в середине пролета с учетом осадки опор – индикатором П-2. Продольные деформации балки определяют проволочными тензодатчиками. По высоте балки ставят пять тензодатчиков: датчик Т-3 на продольной оси балки, датчики Т-1 и Т-5 – на максимально возможном удалении от продольной оси, остальные датчики – в промежутках между указанными датчиками.

3. Определение расчетной нагрузки P^T , подсчет прогибов и напряжений

Для принятой схемы нагружения максимальный изгибающий момент и максимальную поперечную силу определяют по формулам

$$M = \frac{Pl_p}{6} = 20, \quad (1)$$

$$Q = \frac{P}{2} = 0,5P, \quad (2)$$

где $l_p = 120$ см – расчетный пролет балки.

Расчетную нагрузку P^T подсчитывают по минимальной несущей способности балки с учетом:

– прочности балки по нормальным напряжениям

$$Q = \frac{M}{W} = \frac{20P}{W} \leq m_{сл} R_u, \quad (3)$$

тогда при $P = P^T$ получим

$$P^T = \frac{R_u m_{сл} W}{20}, \quad (4)$$

– прочности балки по скалывающим напряжениям

$$\tau = \frac{QS}{Jb} = \frac{0,5PS}{Jb} \leq m_{сл} R_{ск}, \quad (5)$$

тогда при $P = P^T$ получим

$$P^T = \frac{m_{сл} R_{ск} Jb}{0,5S}, \quad (6)$$

где b – ширина сечения;

$R_{ск}$ – расчетное сопротивление древесины скалыванию, принимаемое по СНиП II-25–80, п. 5 б, табл. 3 (для клееной древесины);

$m_{сл}$ – коэффициент, учитывающий толщину слоя δ .

Окончательно за расчетную нагрузку принимают наименьшую величину, подсчитанную с учетом вышеназванных условий.

С целью сравнения разрушающей нагрузки, полученной в результате кратковременных машинных испытаний, с теоретической расчетной нагрузкой P_T , необходимо подсчитать кратковременную расчётную нагрузку:

$$P_{кр}^T = \frac{P^T}{K_{дл}}, \quad (7)$$

где $K_{дл}$ – наиболее вероятное значение коэффициента длительности для древесины при действии постоянных и временных нагрузок ($K_{дл} = 0,66$).

Теоретическое значение максимального прогиба для принятой схемы нагружения балки подсчитывают по формуле:

$$f = 0,0178 \frac{l_P^3}{J} \frac{P^*}{f^*}. \quad (8)$$

Из формулы (8) на основе экспериментальной зависимости прогиб f^* – нагрузка P^* можно получить действительное (с некоторым приближением, так как в формуле (8) не учитывается влияние сил Q) значение модуля упругости древесины для конкретного образца:

$$E^* = 0,0178 \frac{Pl_P^3}{J} \frac{P^*}{f^*}, \quad (9)$$

где P^* – нагрузка, действующая на балку;

f^* – прогиб балки при нагрузке, равной P^* .

Теоретическое значение относительного прогиба балки при действии нормативной нагрузки

$$\frac{f}{l_P} = 0,0178 \frac{Pl_P^2}{\gamma_f EJ}, \quad (10)$$

где γ_f – условный коэффициент надежности ($\gamma_f = 1,2$);

E – модуль упругости древесины вдоль волокон, принимаемый согласно СНиП II-25–80 равным 10000 МПа.

В формуле (10) дополнительную поправку на время действия нагрузки делать не следует, так как нагрузку, действующую на балку P , и модуль упругости древесины вдоль волокон E принимают с учетом длительности действия нагрузки. Полученную по формуле (10) величину сравнивают с предельным отношением прогиба к пролету:

$$\left[\frac{f}{l} \right] = \frac{l^*}{300}. \quad (11)$$

Изгибающий момент балки в месте постановки тензодатчиков при действии расчетной нагрузки P^T равняется:

$$M = \frac{P^T l_p}{6}. \quad (12)$$

Теоретические значения нормальных напряжений в поперечном сечении на уровне постановки равны:

– тензодатчика Т-1

$$\sigma_1 = -\frac{M}{J} \gamma_1, \quad (13)$$

– тензодатчика Т-2

$$\sigma_2 = -\frac{M}{J} \gamma_2, \quad (14)$$

– тензодатчика Т-2

$$\sigma_3 = 0, \quad (15)$$

– тензодатчика Т-4

$$\sigma_4 = -\frac{M}{J} \gamma_4, \quad (16)$$

– тензодатчика Т-5

$$\sigma_5 = -\frac{M}{J} \gamma_5. \quad (17)$$

4. Экспериментальная часть

Балку устанавливают на опоры испытательной машины ГРМ-1 и нагружают через распределительную траверсу сосредоточенной силой в середине пролета. С целью более полного включения всех приборов, проверки их работы и исключения обмятий балки в местах приложения сосредоточенных сил нагружение балки производят два раза.

Первое нагружение балки осуществляют от нулевой нагрузки до нагрузки, равной теоретической расчетной нагрузке P^T (при этом снимают отсчеты по приборам до и после нагружения образца). Затем производят разгрузку до нуля, снимают отсчеты по приборам и создают второе нагружение балки. При втором нагружении балки нагрузку прикладывают поэтапно. Нагрузку на каждом этапе принимают равной $0,2 P^T$.

Данные измерений заносятся в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Результаты измерения прогибов балки

Этап нагружения	Нагрузки Р, кН	Прогибомеры						Средняя величина приращения отсчётов $\Delta C_{cp} = \frac{\Delta C_1 + \Delta C_2}{2}$	Разность приращения отсчётов $\Delta = \Delta C_2 - \Delta C_{cp}$	Полный прогиб балки $f = \sum \Delta K_i$
		П-1		П-2		П-3				
		Отчет С1	Разность отсчетов ΔC_1	Отсчёт С2	Разность отсчётов ΔC_2	Отсчёт С3	Разность отсчётов ΔC_3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0										
1										
2										

Таблица 2

Результаты измерения продольных деформаций в балке

Этап нагружения	Нагрузка Р, кН	Тензодатчики										
		Т-1		Т-2		Т-3		Т-4		Т-5		
		Отчет С1	Разность отсчетов ΔC_1	Отсчёт С2	Разность отсчётов ΔC_2	Отсчёт С3	Разность отсчётов ΔC_3	Отсчёт С4	Разность отсчётов ΔC_4	Отсчёт С5	Разность отсчётов ΔC_5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0												
1												
2												

5. Обработка и анализ результатов испытания

По результатам испытания дают сравнительную оценку клееных балок прямоугольного и двутаврового поперечных сечений (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительная оценка клееных балок разных сечений

№ п/п	Пролёт l , см	Площадь поперечного сечения F , см ²	Момент инерции J см ⁴	Прогиб при нагрузке R^H , мм		Максимальные нормальные напряжения при нагрузке R^T , МПа		Расчетная нагрузка R^T , кН	Разрушающая нагрузка $R_{разр}$, кН	Коэффициент запаса K	Отношение $\frac{R^T}{R_{разр}}$
				теоретический	экспериментальный	теоретические	экспериментальные				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2											
3											

6. Оформление отчета

Отчет о проделанной работе оформляют согласно требованиям, представленным в п. 1.2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое клей?
2. Назовите основные требования к клеям, применяемым в несущих строительных конструкциях?
3. Какие клеи следует применять в несущих конструкциях?
4. Что вызывает внутренние напряжения в клеевых швах?
5. Какие размеры по ширине и толщине досок рекомендуются при изготовлении клеодощатых конструкций?
6. Какая максимальная влажность древесины допускается при склеивании досок?
7. Почему ограничиваются размеры досок и влажность древесины при изготовлении клеодощатых конструкций?
8. Как определяется несущая способность двутавровой клееной балки?
9. Как определяются теоретические значения напряжений в поперечном сечении балки?
10. Для чего в лабораторной работе используется индикатор часового типа?
11. Для чего в лабораторной работе используются тензодатчики?
12. Что такое коэффициент безопасности?

13. Что такое разрушающая нагрузка?
14. Почему нагрузка на образец прикладывается в виде двух сосредоточенных сил?
15. Как определяются экспериментальные значения напряжений в поперечном сечении балки?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Примеры расчета и конструирования [Текст] / В.А. Иванов. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 392 с.
2. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования [Текст] / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 65 с.
3. Карлсен, Г.Г. Конструкции из дерева и пластмасс [Текст] / Г.Г. Карлсен, Ю.В. Слицкоухов. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.
4. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II.25–80) [Текст] / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1986. – 215 с.
5. Ли, В.Д. Основные нормативные материалы для расчета конструкций из дерева и пластмасс [Текст]: метод. указ. / В.Д. Ли, О.Ю. Дериглазов. – Томск, 2005. – Ч. 1. – 25 с.
6. СНиП2.01.07–85. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия [Текст].– М.: Стройиздат, 1985. – 34 с.
7. Зубарев, Г.Н. Конструкции из дерева и пластмасс: [Текст]: учеб. пособие для студ. вузов / Г.Н. Зубарев. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 304 с.
8. Прокофьев, А.С. Конструкции из дерева и пластмасс. Общий курс [Текст]: учебник / А.С. Прокофьев. – М.: Стройиздат. 1996. – 218 с.
9. Пособие по проектированию деревянных конструкций [Текст] / ЦНИИСК Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986. – 143 с.
10. Ковальчук, Л.М. Производство деревянных клееных конструкций [Текст] / Л.М. Ковальчук. – М.: Стройматериалы, 2005. – 334 с.
11. Вдовин, В.М. Конструкции из дерева и пластмасс. Клеедощатые и клеефанерные конструкции [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.М. Вдовин. – М.: Юрайт, 2018. – 211 с.
12. Калугин, А.В. Деревянные конструкции [Текст]: учеб. пособие / А.В. Калугин. – М.: Стройиздат, 1983. – 288 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Напряженное состояние и характеристика элементов	Расчетные сопротивления, МПа/кгс/см ² , для сортов (классов) древесины			
	обозначение	1/К26	2/К24	3/К16
1. Изгиб, сжатие и смятие вдоль волокон:				
а) элементы прямоугольного сечения (за исключением указанных в подпунктах «б», «в») высотой до 50 см. При высоте сечения более 50 см	$R_{и}, R_{с}, R_{см}$	14/140	13/130	8,5/85
б) элементы прямоугольного сечения шириной свыше 11 до 13 см при высоте сечения свыше 11 до 50 см	$R_{и}, R_{с}, R_{см}$	15/150	14/140	10/100
в) элементы прямоугольного сечения шириной свыше 13 см при высоте сечения свыше 13 до 50 см	$R_{и}, R_{с}, R_{см}$	16/160	15/150	11/110
г) элементы из круглых лесоматериалов без врезок в расчетном сечении	$R_{и}, R_{с}, R_{см}$	-	16/160	10/100
2. Растяжение вдоль волокон:				
а) неклееные элементы	R_p	10/100	7/70	-
б) клееные элементы	R_p	12/120	9/90	-
3. Сжатие и смятие по всей площади поперек волокон				
	$R_{с90}, R_{см90}$	1,8/18	1,8/18	1,8/18
4. Смятие поперек волокон местное:				
а) в опорных частях конструкций, лобовых врубках и узловых примыканиях элементов	$R_{см90}$	3/30	3/30	3/30
б) под шайбами при углах смятия от 90 до 60°	$R_{см90}$	4/40	4/40	4/40
5. Скалывание вдоль волокон:				
а) при изгибе неклееных элементов	$R_{ск}$	1,8/18	1,6/16	1,6/16
б) при изгибе клееных элементов	$R_{ск}$	1,6/16	1,5/15	1,5/15
в) в лобовых врубках для максимального напряжения	$R_{ск}$	2,4/24	2,1/21	2,1/21
г) местное в клеевых соединениях для максимального напряжения	$R_{ск}$	2,1/21	2,1/21	2,1/21
6. Скалывание поперек волокон:				
а) в соединениях неклееных элементов	$R_{ск90}$	1/10	0,8/8	0,6/6
б) в соединениях клееных элементов	$R_{ск90}$	0,7/7	0,7/7	0,6/6
7. Растяжение поперек волокон элементов из клееной древесины				
	R_{p90}	0,35/3,5	0,3/3	0,25/2,5

Таблица 2

Модули упругости древесины

Порода	Модуль упругости, 10^3 кг/см ² , при						Модули сдвига		
	сжатии			растяжении			G _{ra}	G _{tr}	G _{rt}
	E _a	E _r	E _t	E _a	E _r	E _t			
Сосна	117	0,2	5,0	117	5,1	4,3	11,4	7,1	—
Ель	142	5,9	3,6	143	6,2	4,2	-	—	0,5
Дуб	140	12,9	9,1	140	11,0	8,3	13,2	9,1	4,4
Береза	158	6,0	4,5	181	6,0	4,2	14,5	8,0	2,0

Таблица 3

Объемный вес. Предел прочности. Модуль упругости

Порода и район произрастания	Объемный вес при влажности 15 %, кг/м ³	Предел прочности при 15 % влажности, кг/см ²			Модуль упругости при статическом изгибе
		при сжатии вдоль волокон	при изгибе	при растяжении вдоль волокон	
Береза обыкновенная	640	447	997	-	124000
Береза (Урал)	650	527	984	-	-
Дуб	720	520	935	1288	73000
Ель обыкновенная (северная)	460	423	774	1223	-
Ель обыкновенная (центральные районы)	460	385	722	1076	-
Ель (Урал)	440	353	640	-	75000
Ель (Сибирь)	390	353	603	722	87000
Лиственница (Урал)	680	511	973	-	130000
Лиственница (Сибирь)	600	615	978	1205	132000
Сосна обыкновенная (северная)	540	466	877	-	-
Сосна (центральные районы)	530	439	793	1150	145000
Сосна (Украина)	540	384	732	963	107000
Сосна (Урал)	530	423	717	-	-
Сосна (Сибирь)	480	427	736	931	102000