

Механические свойства древесины

**Составитель - Г.А. Горбачева, доц., к.т.н.
Московский государственный университет леса
кафедра древесиноведения**

2010 год

Свойства древесины, проявляющиеся под действием механических нагрузок:

- **прочность** – способность сопротивляться разрушению, показатель – предел прочности σ_w ;
- деформативность** – способность сопротивляться изменению размеров и формы; показатели – модули упругости E , модули сдвига G и коэффициенты поперечной деформации μ ;
- **технологические и эксплуатационные свойства** – ударная вязкость, твердость, износостойкость, способность удерживать крепления и т.д.

Виды нагрузок

- **статические** (плавно возрастающие);
- **ударные** (действующие внезапно полной величиной);
- **вибрационные** (попеременно изменяющие величину и направление);
- **долговременные** (действующие весьма продолжительное время).

Показатели механических свойств древесины определяют обычно при **растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге** (реже при кручении).

Древесина – анизотропный материал, испытания проводят в разных направлениях: **вдоль или поперек волокон** (в **радиальном** или **тангенциальном** направлении).

В древесине под действием внешних нагрузок возникают силы сопротивления. Эти силы, приходящиеся на единицу площади сечения тела, называются **напряжением** и выражаются в Н/мм² или МПа.

Деформация - изменение размеров и формы тела под действием нагрузок.

Нормальные напряжения σ действуют по нормали (перпендикуляру) к сечению тела.

Касательные напряжения τ действуют в плоскости сечения.

Предел прочности σ_w - максимальное напряжение, предшествующее разрушению тела.

Напряжения и деформации могут возникать в теле и без участия внешних нагрузок вследствие неоднородных изменений его объема при сушке, увлажнении, нагревании и т. д.

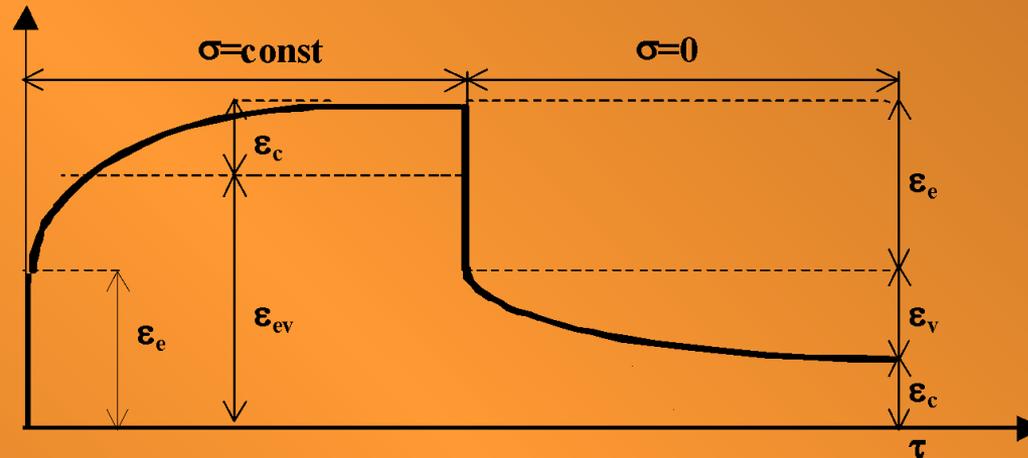
У древесины близкая к линейной зависимость между напряжениями и деформациями наблюдается при кратковременных нагрузках до величины напряжений, соответствующей **пределу пропорциональности**. При этом можно с приближением считать, что древесина подчиняется **закону Гука**. Для древесины характерны явно выраженные различия упругих свойств по разным направлениям, т. е. упругая анизотропия. Следовательно, применительно к древесине должна использоваться **теория упругости анизотропного тела**.

Определение упругих деформаций по обобщенному закону Гука

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{\sigma_a}{E_a} - \frac{\mu_{ar}\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{at}\sigma_t}{E_t}; & \gamma_{ta} &= \frac{\tau_{ta}}{G_{ta}}; \\ \varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{rt}\sigma_t}{E_t} - \frac{\mu_{ra}\sigma_a}{E_a}; & \gamma_{ar} &= \frac{\tau_{ar}}{G_{ar}}; \\ \varepsilon_t &= \frac{\sigma_t}{E_t} - \frac{\mu_{tr}\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{ta}\sigma_a}{E_a}; & \gamma_{rt} &= \frac{\tau_{rt}}{G_{rt}}, \end{aligned} \right\}$$

где ε – относительное удлинение или укорочение; γ – относительный сдвиг.

СХЕМА ИЗМЕНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ДРЕВЕСИНЫ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ СТАБИЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И ВЛАЖНОСТИ



ϵ_e - упругая деформация, вследствие обратимого изменения средних междучастичных расстояний;

ϵ_v - высокоэластическая деформация, связанная с обратимой перегруппировкой частиц (звеньев цепных молекул); при этом объем тела не изменяется;

ϵ_c - вязко-текучая, деформация ползучести, обусловленная необратимым смещением молекулярных цепей; объем тела при этом не изменяется.

Полимеры могут находиться в трех физических состояниях – стеклообразном, высокоэластическом и вязко-текучем. Каждое из них характеризуется преобладающим типом деформаций. Для первого состояния характерны обратимые упругие деформации, для второго – также обратимые высокоэластические, для третьего – необратимые вязко-текучие.

Переход полимеров из одного состояния в другое обычно происходит при изменении температуры, критические значения которой называются температурой стеклования и температурой текучести. Способность к увеличению деформации достигается не только повышением температуры, но и введением пластификатора.

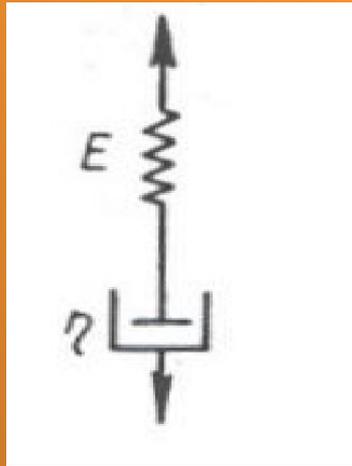
Реология – наука, устанавливающая наиболее общие законы развития во времени деформаций и течения любых веществ. Различают **феноменологическую** (характеризует внешние проявления механических свойств материала под действием нагрузки во времени) и **молекулярную** (изучает молекулярный механизм деформаций) реологию.

Реологические модели

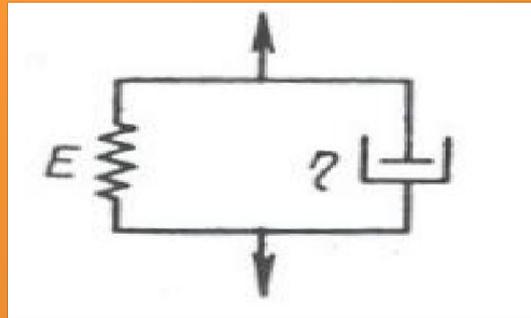
В качестве модели идеально упругого тела, подчиняющегося закону Гука, используется пружина:

$$\sigma = E\varepsilon$$

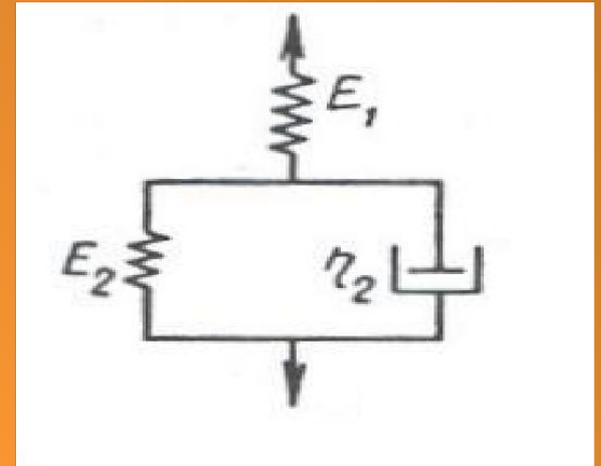
Для вязкого тела моделью служит Ньютонская жидкость – демпфер в виде поршня, движущегося в цилиндре с вязкой жидкостью. Такое тело подчиняется закону Ньютона: $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$



а



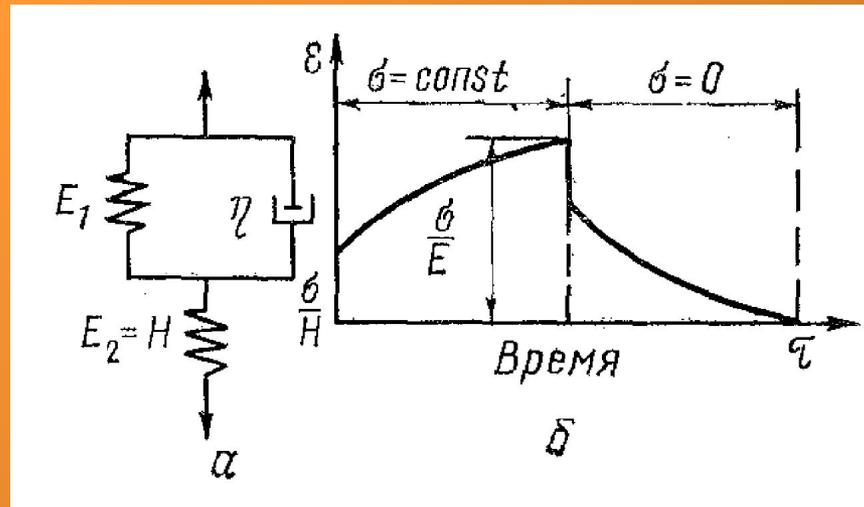
б



в

а – Максвеллово тело, б – модель Кельвина, в – модель стандартного линейного вязко-упругого тела.

Модель стандартного линейного вязко-упругого тела

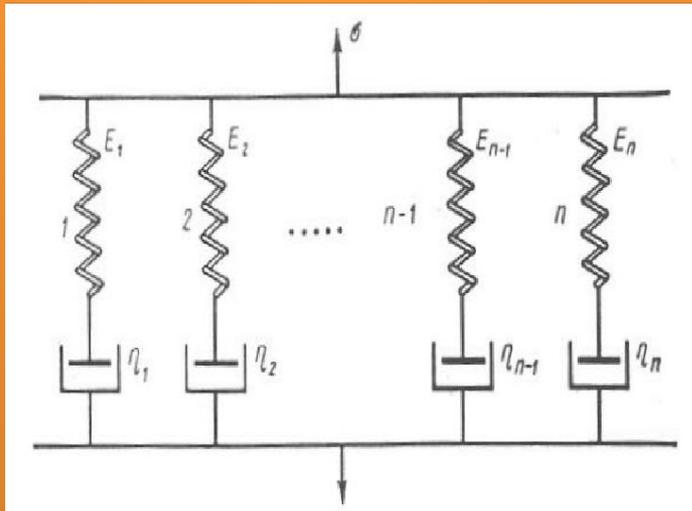


где $n = \frac{\eta_2}{E_1 + E_2}$ – время релаксации,

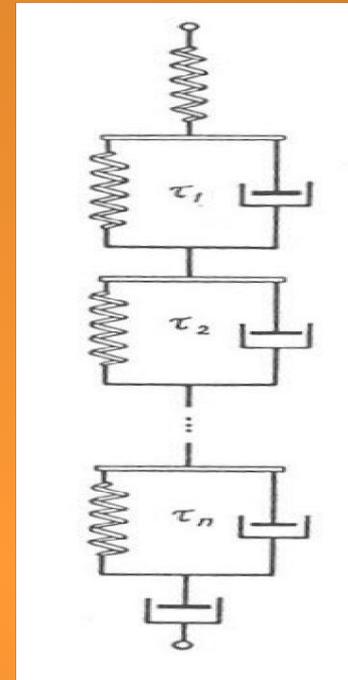
$H = E_2$ – мгновенный модуль упругости,

$E = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ – длительный модуль упругости.

Реологические модели, учитывающие наличие широкого набора времен релаксации



а



б

а – модель Куна, б – модель Алфрея

Особенности механических испытаний древесины

1. Методики испытаний стандартизованы (разработаны ГОСТы на методы определения показателей физико-механических свойств древесины).
2. Используются малые чистые (без пороков) образцы древесины. Образцы должны содержать 4-5 годичных слоев, базисное сечение примерно 20x20мм.
3. Древесина – анизотропный материал. Испытания проводятся в направлениях вдоль или поперек волокон (в радиальном или тангенциальном направлении).
4. Древесина – очень изменчивый материал. Испытывается партия образцов, результаты обрабатываются статистическими методами.
5. Показатели механических свойств древесины сильно зависят от ее влажности. При увлажнении древесины до предела насыщения клеточных стенок, показатели всех механических свойств резко уменьшаются. Дальнейшее повышение влажности древесины (свыше 30 %) практически не отражается на показателях механических свойств. Испытания проводят при нормализованной влажности 12%.

1. Для пересчета показателей механических свойств (кроме показателей деформативности) к нормализованной влажности используют формулу:

$$B_{12} = B_W [1 + \alpha (W - 12)],$$

где B_{12} – показатель данного свойства при влажности 12 % (σ , τ , и др.); B_W – показатель свойства при влажности W (σ , τ , H , A); W – влажность древесины в момент испытаний; H , A – поправочный коэффициент на влажность, показывающий насколько изменяется показатель данного свойства при изменении влажности на 1 %.

Для пересчета значений модулей упругости и коэффициентов поперечной деформации используют формулу

$$C_{12} = \frac{C_W}{1 - \alpha (W - 12)},$$

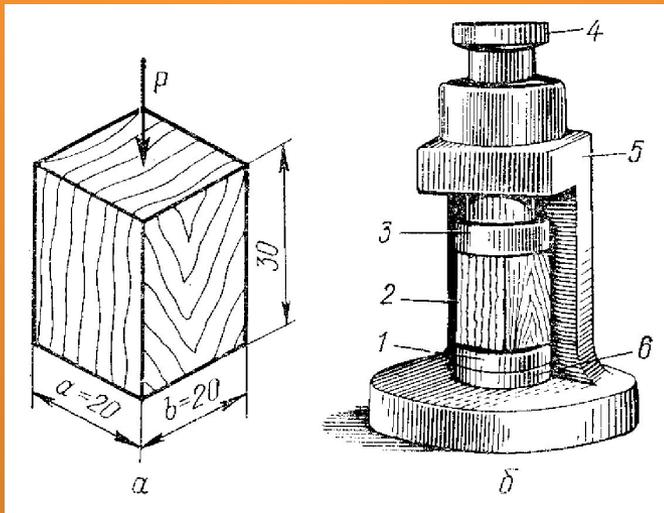
где C_{12} – показатель свойства при влажности 12 %; C_W – показатель свойства при влажности W .

Приведение полученных показателей прочности и деформативности B_W к нормализованной влажности B_{12} можно осуществлять по следующим формулам:

$$B_{12} = B_W K \quad \text{или} \quad B_{12} = \frac{B_W}{K_{12}^W},$$

где K или K_{12}^W - коэффициенты.

Прочность древесины при сжатии вдоль волокон



a – образец; *б* – приспособление:
1, б – съемная шаровая опора; 2 –
образец; 3 – пуансон; 4 – шаровая опора;
5 – корпус

$$\sigma_W = \frac{P_{\max}}{a \cdot b}$$

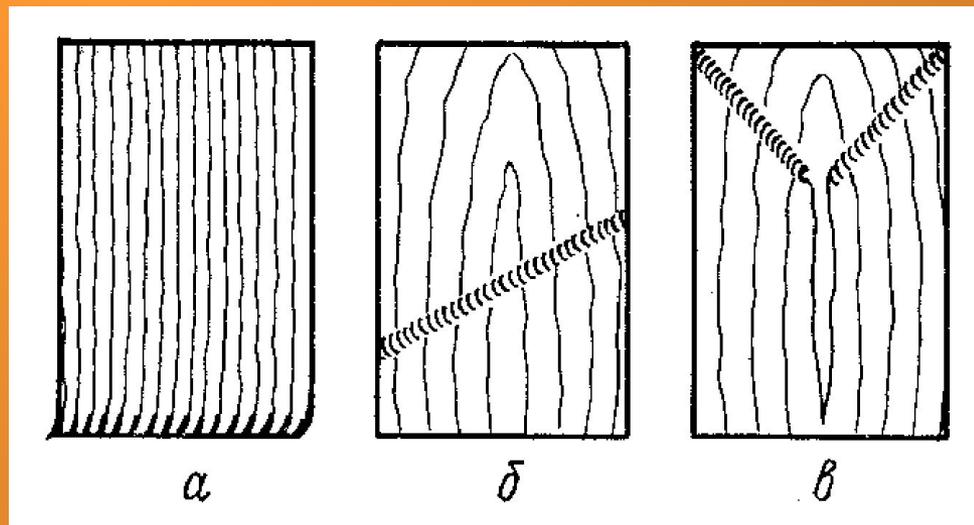


Прочность древесины при сжатии вдоль волокон

| Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | | Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | |
|-----------------|---|------------|--------------|---|------------|
| | 12 | 30 и более | | 12 | 30 и более |
| Лиственница | 62 | 25 | Дуб | 57 | 31 |
| Сосна | 46 | 21 | Бук | 53 | 27 |
| Ель | 45 | 19 | Орех грецкий | 55 | 23 |
| Кедр | 40 | 16 | Береза | 54 | 26 |
| Пихта сибирская | 40 | 17 | Вяз | 47 | 25 |
| Акация белая | 73 | 41 | Липа | 46 | 24 |
| Граб | 61 | 36 | Ольха | 45 | 23 |
| Клен | 59 | 28 | Осина | 43 | 19 |
| Ясень | 56 | 32 | Тополь | 40 | 17 |
| Груша | 58 | 26 | | | |

В среднем для всех изученных пород при влажности 12 % предел прочности на сжатие вдоль волокон примерно равен **50** МПа.

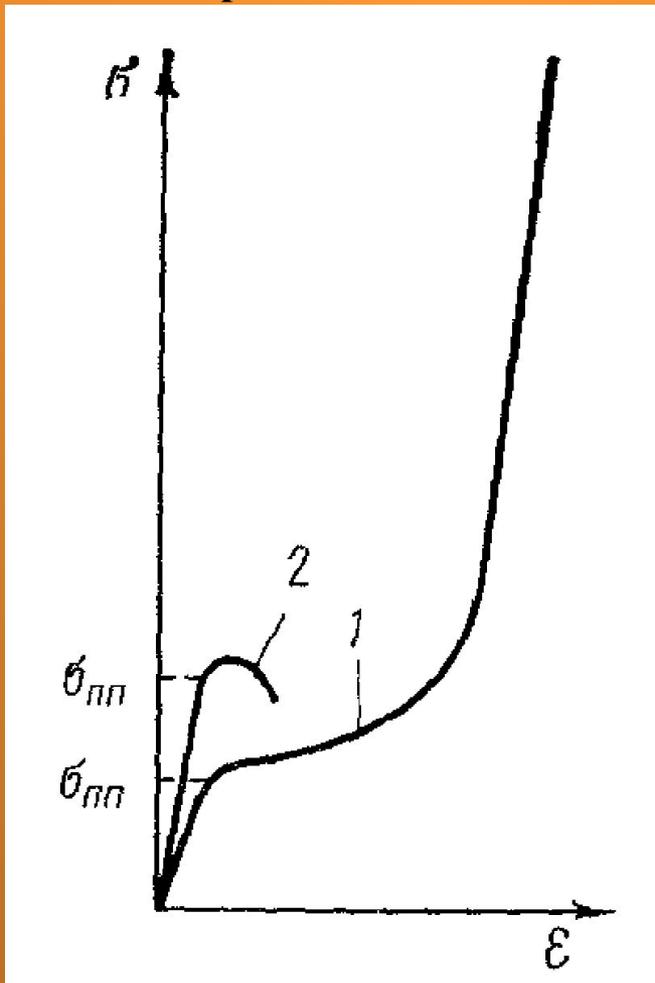
Типичные виды разрушения образца при сжатии ВДОЛЬ ВОЛОКОН



а – смятие торцов; *б* – косая складка; *в* – встречные косые складки с продольным расколом

Прочность древесины при сжатии поперек волокон

Диаграммы сжатия древесины
поперек волокон



1 – трехфазная:

- хвойные, радиальное направление
- лиственные, радиальное и тангенциальное направления (менее выраженная)

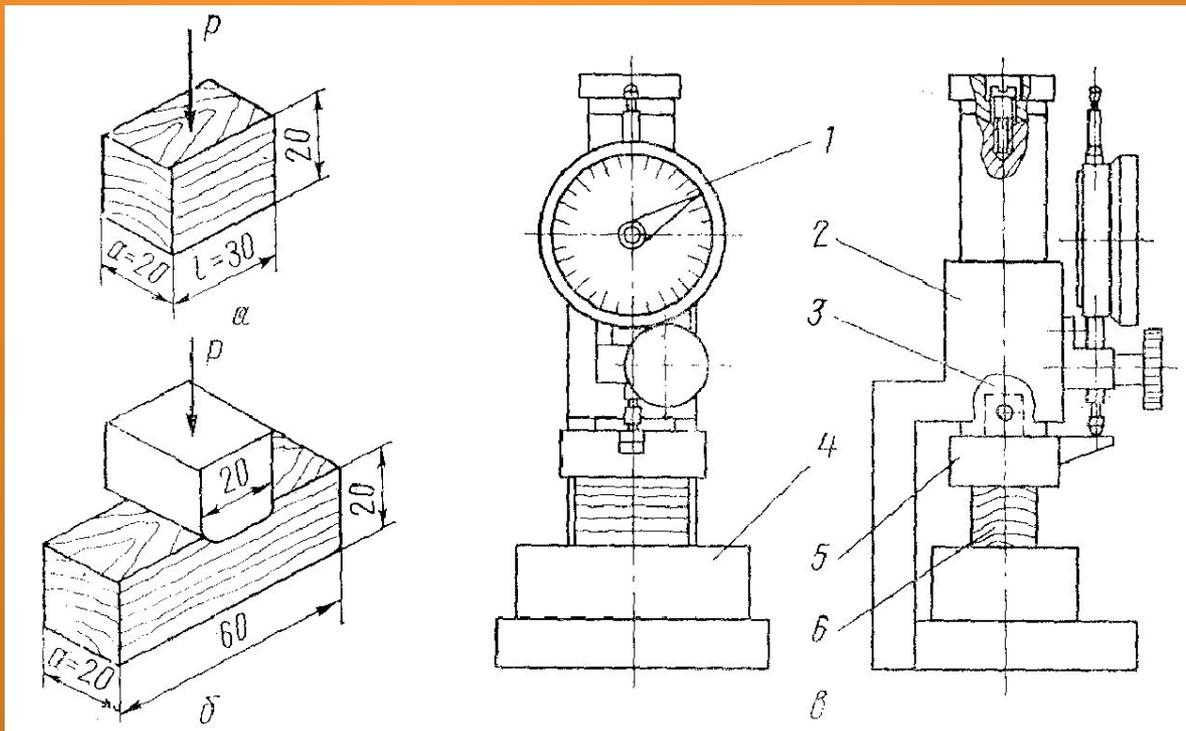
2 – однофазная:

- хвойные, тангенциальное направление

Поскольку в большинстве случаев при действии сжимающих усилий поперек волокон не удается установить максимальную нагрузку, приводящую к окончательному разрушению образца, ограничиваются определением **предела пропорциональности**, который принимают за **условный предел прочности**.

Различают два вида испытаний – на **сжатие** и **местное смятие** поперек волокон. При первом виде испытаний нагрузка прикладывается равномерно по всей поверхности образца, при втором – по всей ширине, но лишь на части длины. Возможен и третий вид испытаний, при котором нагрузка прикладывается на площадку, ограниченную частью ширины и длины образца.

Испытания древесины на сжатие и местное смятие поперек волокон



a – образец для испытания на сжатие; *б* – образец и схема испытаний на смятие; *в* – приспособление для испытаний: 1 – индикатор; 2 – корпус; 3 – шток; 4 – подставка; 5 – съемный пуансон; 6 – образец

$$\sigma_{w.y} = \frac{P_{y.n}}{al}$$

$$\sigma_{w.y} = \frac{P_{y.n}}{18a}$$

18 - средняя ширина выступа пуансона, мм

Условные пределы прочности при сжатии и местном смятии поперек волокон

| Порода | Условный предел прочности, МПа | | | | | | | |
|-------------|---|------------|-----|------------|---|------------|------|------------|
| | Сжатие поперек волокон при влажности, % | | | | Местное смятие поперек волокон при влажности, % | | | |
| | 12 | 30 и более | 12 | 30 и более | 12 | 30 и более | 12 | 30 и более |
| | 1 | | 2 | | 1 | | 2 | |
| Лиственница | 4,3 | 2,6 | 6,1 | 2,4 | 6,1 | 3,6 | 9,3 | 3,8 |
| Сосна | 5,1 | 3,0 | 7,5 | 3,0 | – | – | 13,6 | 5,6 |
| Пихта | 2,1 | 1,3 | 2,4 | 1,0 | 2,5 | 1,5 | 3,5 | 1,4 |
| Граб | 6,5 | 3,9 | 6,0 | 3,6 | 13,7 | 8,0 | 11,3 | 6,9 |
| Ясень | – | – | – | – | 8,3 | 5,1 | 10,6 | 6,5 |
| Дуб | – | – | – | – | 9,1 | 5,5 | 5,3 | 3,2 |
| Бук | 6,1 | 3,6 | 6,3 | 3,8 | 11,4 | 6,9 | 10,8 | 6,7 |
| Вяз | 5,7 | 3,4 | 4,6 | 2,8 | 11,0 | 6,7 | 11,0 | 6,7 |
| Липа | 5,5 | 3,3 | 5,1 | 3,0 | 9,6 | 5,9 | 9,8 | 6,0 |
| Ольха | 6,7 | 4,1 | 3,7 | 2,3 | 8,0 | 4,9 | 5,3 | 3,2 |
| Осина | 5,4 | 3,2 | 3,5 | 2,1 | 6,3 | 3,8 | 4,8 | 2,8 |

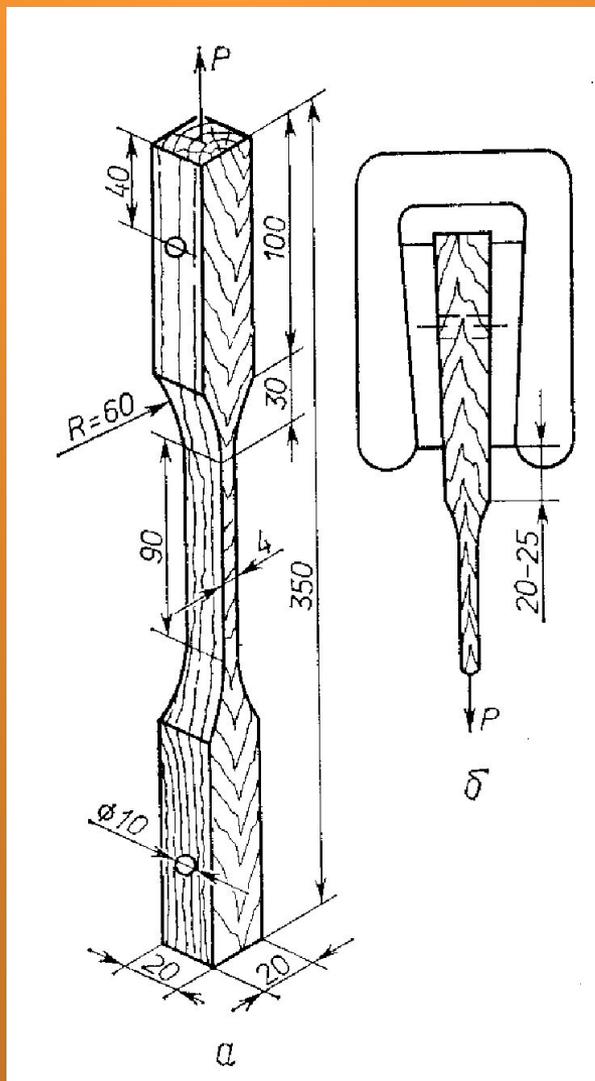
Условный предел прочности при сжатии поперек волокон для всех пород в среднем примерно в **10** раз меньше предела прочности при сжатии вдоль волокон.

Все три возможных случая действия сжимающих нагрузок встречаются в практике.

- сжатие поперек волокон - изготовление прессованной древесины,
- местное смятие - в шпалах под рельсами,
- нагрузка прикладывается на часть длины и ширины – при использовании древесины в качестве подкладок под стойки и т. д.

Прочность древесины при растяжении вдоль

ВОЛОКОН



$$\sigma_w = \frac{P_{\max}}{a \cdot b}$$

$$a=4 \text{ мм}, b=20 \text{ мм}$$

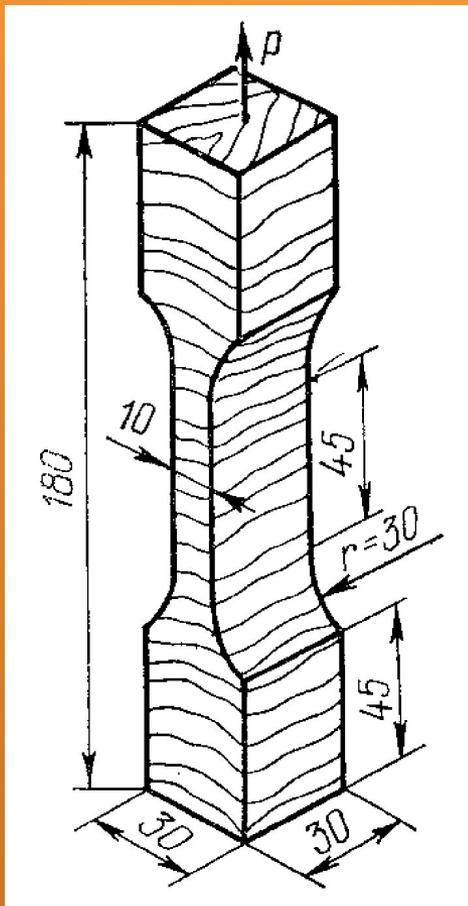
Прочность древесины при растяжении вдоль волокон

| Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | | Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | |
|--------------|---|------------|--------|---|------------|
| | 12 | 30 и более | | 12 | 30 и более |
| Лиственница | 124 | 95 | Ясень | 140 | 107 |
| Сосна | 109 | 78 | Граб | 129 | 96 |
| Ель | 101 | 77 | Осина | 121 | 93 |
| Кедр | 89 | 68 | Бук | 124 | 93 |
| Пихта | 66 | 51 | Липа | 117 | 89 |
| сибирская | | | | | |
| Акация белая | 171 | 107 | Ольха | 97 | 74 |
| Береза | 137 | 102 | Тополь | 88 | 67 |

В среднем для всех пород предел прочности на растяжение вдоль волокон **130** МПа

Прочность древесины при растяжении поперек

ВОЛОКОН



$$\sigma_w = \frac{P_{\max}}{a \cdot b}$$

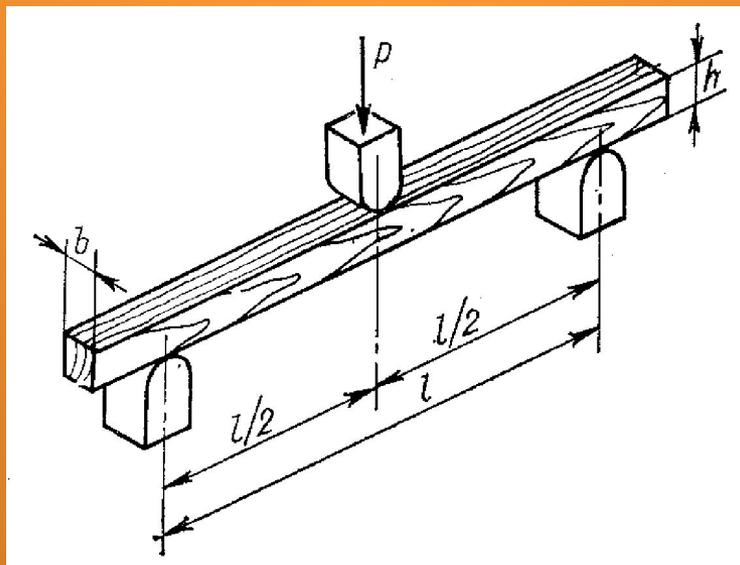
$$a=10 \text{ мм}, b=30 \text{ мм}$$

Прочность древесины при растяжении поперек волокон

| Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | | | | Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | | | |
|-------------|---|-----|-----|-----|--------|---|-----|-----|-----|
| | 12 | >30 | 12 | >30 | | 12 | >30 | 12 | >30 |
| | 1 | | 2 | | | 1 | | 2 | |
| Лиственница | 5,6 | – | 5,2 | – | Граб | 13,3 | – | 8,4 | – |
| Сосна | 5,4 | 3,9 | 3,5 | 2,4 | Клен | 13,3 | – | 9,2 | – |
| Ель | 5,0 | – | 3,2 | – | Бук | 12,5 | – | 8,5 | – |
| Кедр | 4,2 | – | 2,8 | – | Береза | 11,1 | 5,7 | 6,5 | 3,5 |
| Пихта | 4,0 | – | 2,9 | – | Липа | 8,3 | – | 5,0 | – |
| Ясень | 9,0 | – | 4,2 | – | Ольха | 7,2 | – | 5,9 | – |
| Дуб | 8,0 | 7,4 | 6,5 | 6,1 | Осина | 7,1 | – | 4,6 | – |

В среднем прочность при растяжении поперек волокон для всех изученных пород составляет примерно **1/20** прочности при растяжении вдоль волокон.

Прочность древесины при статическом изгибе

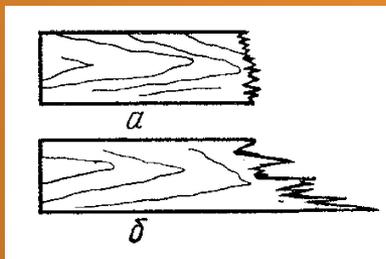


Образец в виде бруска размерами 20×20×300 мм.

$$\sigma_W = \frac{3P_{\max} l}{2bh^2}$$

$b=20$ мм, $h=20$ мм,
 $l=240$ мм

Вид излома образца при
изгибе



a – гладкий - низкая прочность

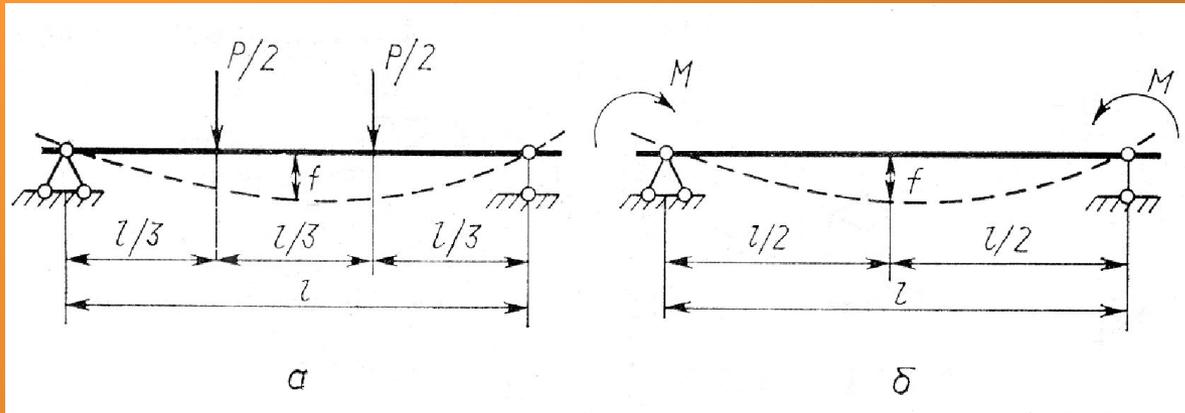
б – зацепистый – высокая прочность

Прочность древесины при статическом изгибе

| Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | | Порода | Предел прочности, МПа, при влажности, % | |
|--------------------|--|------------|-----------------|--|------------|
| | 12 | 30 и более | | 12 | 30 и более |
| Лиственница | 109 | 61 | Орех грецкий | 108 | 60 |
| Сосна | 85 | 49 | Береза | 110 | 65 |
| Ель | 79 | 43 | Бук | 104 | 63 |
| Кедр | 69 | 36 | Дуб | 103 | 66 |
| Пихта сибирская | 68 | 40 | Вяз | 92 | 58 |
| Акация белая | 148 | 96 | Липа | 86 | 53 |
| Граб | 128 | 74 | Ольха | 79 | 48 |
| Ясень | 118 | 73 | Осина | 77 | 45 |
| Клен | 115 | 66 | Тополь | 68 | 40 |
| Груша | 106 | 62 | | | |

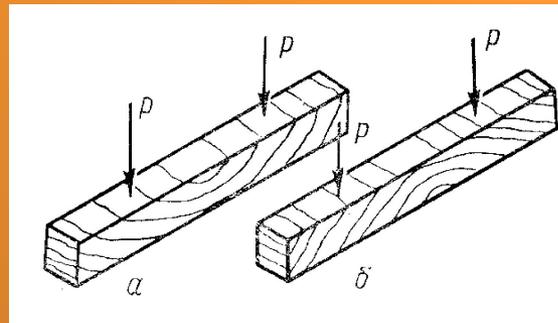
Предел прочности при статическом изгибе в среднем можно принять равным **100** МПа.

Схемы испытаний на изгиб образца



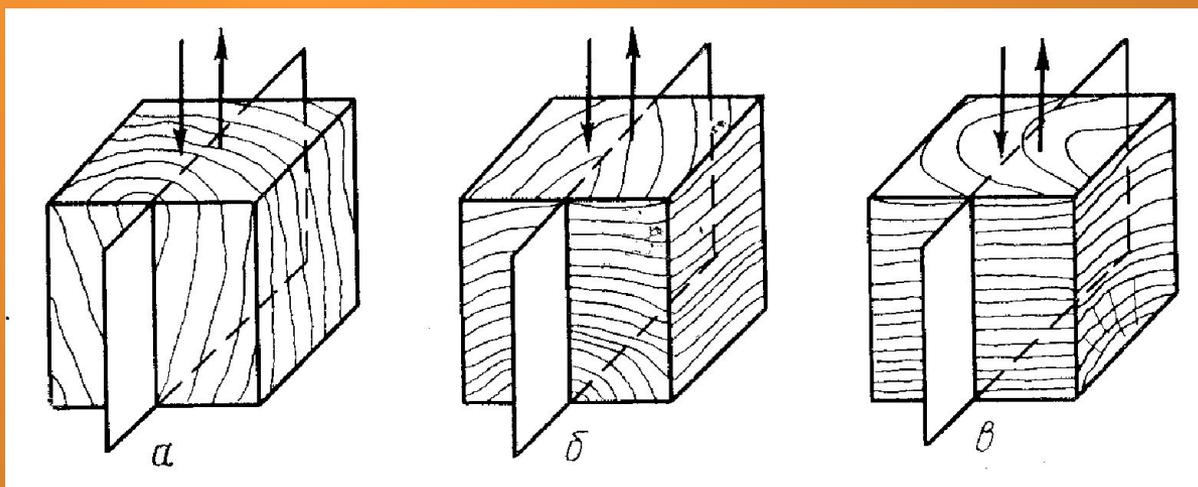
a – при нагружении в двух точках; *b* – при нагружении сосредоточенными моментами

Схема действия усилий при изгибе образцов с поперечным относительно оси направлением волокон



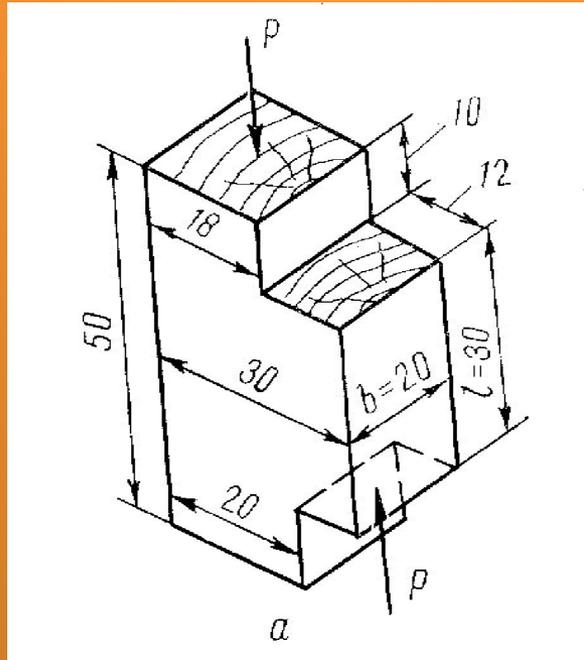
Прочность древесины при сдвиге

Случаи сдвига древесины

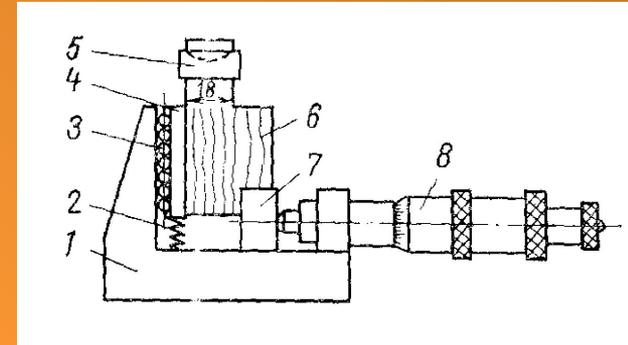


a – скалывание вдоль волокон; *б* – скалывание поперек волокон; *в* – перерезание древесины поперек волокон

Скалывание древесины вдоль волокон



Приспособление для испытания на скалывание древесины вдоль волокон



1 – корпус; 2 – пружина; 3 – ролики; 4 – подвижная планка; 5 – нажимная призма; 6 – образец; 7 – подвижная опора; 8 – прижимное устройство

$$\tau_W = \frac{P_{\max}}{bl}$$

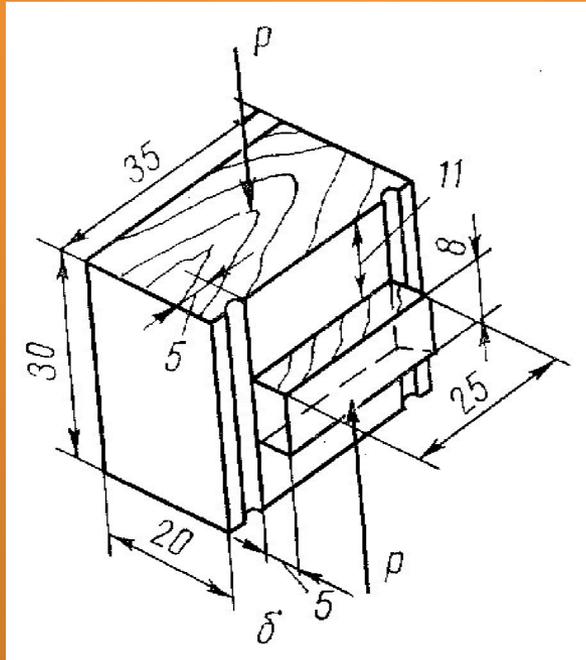
$$b=20 \text{ мм}, l=30 \text{ мм}$$

Прочность древесины при скалывании вдоль волокон

| Порода | Предел прочности, МПа, при скалывании в плоскости | | | | Порода | Предел прочности, МПа, при скалывании в плоскости | | | |
|-----------------|---|------------|---------------------------------|------------|--------------|---|------------|---------------------------------|------------|
| | радиальной при влажности, % | | тангенциальной при влажности, % | | | радиальной при влажности, % | | тангенциальной при влажности, % | |
| | 12 | 30 и более | 12 | 30 и более | | 12 | 30 и более | 12 | 30 и более |
| Лиственница | 9,8 | 6,2 | 9,1 | 5,7 | Орех грецкий | 10,7 | 5,8 | 11,4 | 6,0 |
| Сосна | 7,4 | 4,2 | 7,2 | 4,4 | Дуб | 9,9 | 7,4 | 11,8 | 8,8 |
| Ель | 6,8 | 4,0 | 6,7 | 4,3 | Береза | 9,0 | 5,8 | 10,9 | 7,0 |
| Кедр | 6,4 | 3,8 | 6,4 | 4,0 | Вяз | 8,9 | 6,4 | 9,9 | 7,2 |
| Пихта сибирская | 5,9 | 3,7 | 5,7 | 3,6 | Груша | 8,6 | 5,5 | 13,3 | 7,9 |
| Граб | 14,7 | 8,5 | 18,5 | 10,7 | Липа | 8,4 | 5,5 | 8,0 | 4,9 |
| Ясень | 13,4 | 9,2 | 13,0 | 8,6 | Ольха | 8,0 | 5,1 | 9,8 | 6,2 |
| Клен | 12,0 | 7,7 | 13,7 | 8,5 | Осина | 6,2 | 3,5 | 8,4 | 4,9 |
| Бук | 12,1 | 7,3 | 14,0 | 8,7 | Тополь | 6,0 | 3,3 | 7,2 | 4,1 |

Прочность древесины при скалывании вдоль волокон у лиственных пород примерно в 1,6 раза выше, чем у хвойных. В среднем для всех пород предел прочности при скалывании вдоль волокон составляет примерно **1/5** предела прочности при сжатии вдоль волокон.

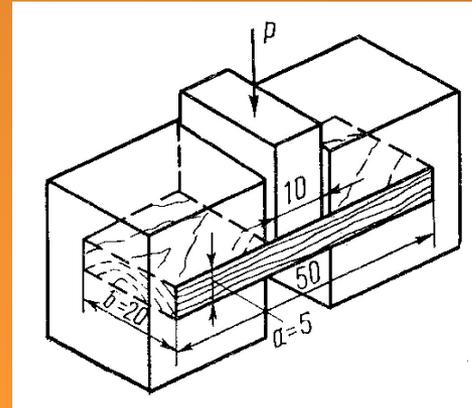
Скалывание поперек волокон



$$\tau_W = \frac{P_{\max}}{bl}$$

$$b=8 \text{ мм}, l=25 \text{ мм}$$

Перерезание поперек волокон



$$\tau_W = \frac{P_{\max}}{2ab}$$

$$a=5 \text{ мм}, b=20 \text{ мм}$$

Предел прочности при скалывании поперек волокон в **2** раза меньше, а предел прочности при перерезании поперек волокон в **4** раза больше, чем предел прочности при скалывании вдоль волокон.