

## О ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЯХ В ДРЕВЕСИНЕ

**В. Р. АВАКЯН**

Ассистент

(Ленинградская лесотехническая академия)

Неуклонно возрастающие требования, предъявляемые к качеству изделий из древесины, заставляют обратиться к изучению влияния внутренних напряжений на физико-механические, технологические и другие свойства древесины. Еще в XVIII веке предпринимались попытки объяснить деформации древесины наличием у нее собственных внутренних напряжений, но до сих пор этот вопрос должным образом не изучен. Тем не менее, развитие теоретических основ деревообработки и смежных с ней наук создает предпосылки для детального изучения проблемы внутренних напряжений в древесине.

Останавливаясь на понятии внутренних напряжений, следует сказать, что внутренними напряжениями называются, независимо от причин их возникновения, такие напряжения, которые существуют в теле при отсутствии воздействия на него внешних факторов.

Внутренние напряжения возникают под влиянием температурных колебаний, колебаний влажности, механических воздействий и множества других причин, причем тело может одновременно испытывать внутренние напряжения, обусловленные несколькими причинами. Принимая во внимание, что влияние этих причин меняется и в направлении и во времени, приходится признать, что общая картина внутренних напряжений в теле может быть весьма сложной.

Все тела находятся в напряженном состоянии, причем природа, причины и величины этих напряжений отличаются разнообразием, а сами напряжения внутри взаимно уравновешены.

Внутренние напряжения, свойственные древесине, в отличие от внутренних напряжений в металлах, вызываемых внешними факторами и остающимися после прекращения их действия, не являются следствием воздействия внешних сил, а обусловлены физико-химическими свойствами и анатомическим строением древесины. Поэтому представляется целесообразным сохранить для древесины термин «внутренние напряжения», а не «остаточные напряжения», как принято в теории металлов.

Если в металлах остаточные напряжения могут уменьшаться в результате сотрясений, колебаний и т. д. (Ф. Ф. Витман, 1933), то внутренние напряжения в древесине не исчезают и не ослабевают заметно от упомянутых причин ввиду того, что механические воздействия, оказываемые на древесину, сводятся к упругим деформациям древесины.

К изменению внутренних напряжений приводит пластическая деформация, которая весьма резко проявляется при термической обработке древесины.

Внутренние напряжения древесины являются следствием усушки и анатомического строения древесины:

вследствие гигроскопичности древесина подвержена частым изменениям влагосодержания, которые вызывают в ней внутренние напряжения, достигающие значительных величин при резких изменениях влажности в процессе сушки;

анатомия древесины и ее биологическое происхождение, то есть, форма растущего дерева, его внутреннее строение, физико-химические свойства древесных тканей — все это обуславливает еще во время роста дерева возникновение внутренних напряжений в древесных тканях.

Следует остановиться на некоторых существующих результатах исследований и взглядах на данный вопрос.

Ствол дерева в период роста противостоит нагрузкам от собственного веса, от осадков, ветра и прочих воздействий, то есть древесный ствол должен обладать свойствами пружины, консольной балки и рессоры (В. Ф. Раздорский, 1932). Этому соответствует форма ствола (тело равного сопротивления) и внутреннее строение (слоистость и спиральные напряжения фибрилл).

Исследования проф. А. И. Кузнецова дают ему возможность утверждать, что «внутренние напряжения в древесных стволах распределяются следующим образом: периферические волокна находятся в состоянии продольного растяжения и поперечного (тангентального) сжатия; волокна центральной зоны ствола, напротив, сжаты вдоль длины и растянуты в радиальном и тангентальном направлениях» (А. И. Кузнецов, 1950).

Таким образом, ствол растущего дерева представляет весьма совершенное сооружение как по форме и анатомическому строению, так и по наличию и распределению в нем внутренних напряжений. Установлено, что:

а) с увеличением диаметра бревна деформации уменьшаются;

б) при одинаковых диаметрах стволов величины деформации (стрела прогиба) у сосновых и еловых образцов почти одинаковы, но внутренние напряжения несколько различны ввиду различных значений модулей упругости;

в) за пределом точки насыщения волокон влажность не влияет на внутренние напряжения.

В практике отмечается, что анизотропность древесины является недостатком древесины как материала. Анизотропия возникает в растущем дереве и является неизбежным следствием самого конструктивного оформления ствола, представляемого в виде пружины-рессоры.

Достоинства дерева-ствола как сооружения исчезают после его рубки, однако, в зависимости от дальнейшего назначения древесины и способов ее обработки (распиловка, строгание, колка, высушивание, лущение и т. д.) древесина либо сохраняет упомянутые свойства ствола, либо утрачивает их совсем или частично, либо приобретает новые, благодаря чему и внутренние напряжения также меняются.

При оценке технического значения внутренних напряжений необходимо, кроме непосредственного влияния их на свойства сортамента, учитывать и значение сопутствующих напряжений деформаций, а также связанные с напряжениями особенности анатомического строения древесины.

Возникновение внутренних напряжений от усушки исследовано до-

статочно подробно, и если прежде деформации усушки объяснялись только с качественной стороны, то в настоящее время ряд авторов вполне обоснованно дает и количественную характеристику этого явления.

В 1873 году в курсе технологии дерева, читавшемся в Технологическом институте, акад. А. В. Гадолин впервые предложил аналитическую формулу, позволяющую вычислить величину коробления от усушки и зависимость коробления от размеров доски и расположения последней в стволе дерева или в бревне (А. В. Гадолин, 1873). Эта формула имеет следующий вид:

$$y = (1 - v) [(x \sin \omega \delta - l)(1 - \cos \omega \delta)]$$

где:  $v$  — коэффициент усушки для радиального направления;  
 $x = \frac{b}{2}$  — половинная ширина доски;  
 $\mu$  — коэффициент усушки для тангентального направления;  
 $\delta = \mu - v$  — разность коэффициентов усушки;  
 $\omega$  — угол наклона сердцевинного луча к радиусу годичного слоя;  
 $l$  — расстояние доски от центра бревна (сердцевины), то есть место расположения выпиленной доски в бревне.

Из формулы видно, что величина коробления  $y$  будет тем больше, чем больше  $x$  и чем меньше  $l$ , то есть коробление больше у краев (у кромки) доски и для досок, у которых широкая плоскость (пласть) выпилена ближе к сердцевине бревна.

Формула дает возможность определить величину коробления в любой точке доски по ширине. Коробление в доске будет симметричным или несимметричным в зависимости от расположения сердцевинного луча в доске. Наиболее невыгодное коробление будет как по ширине, так и по длине доски, когда перпендикулярный к ширине пласти сердцевинный луч проходит по диагонали. Поэтому при распиловке досок и заготовке желательного добиваться того, чтобы сердцевинный луч проходил симметрично по длине и по ширине.

Работа акад. А. В. Гадолина дает возможность сделать вывод, что выпиливать заготовки желательно трапециoidalной формы с тем, чтобы не нарушать нормального сбега ствол (необрезные доски). Не удивительно, что в практике столярно-механических производств в начале XX века как у нас, так и за рубежом встречались ответственные щитовые конструкции, собранные из деревянных деталей трапециoidalной формы.

Установлено, что величина появляющихся при сушке древесины внутренних напряжений в пределах точки насыщения волокон, то есть от 0 до 33%, практически пропорциональна насыщению, но вследствие анизотропии древесины они неодинаковы по разным направлениям, что приводит к нарушению первоначальной формы заготовки, к ее короблению.

Величины деформации характеризуются коэффициентами усушки  $\alpha$ , значения которых при полной усушке изменяются вдоль волокон на величины, измеряемые долями процента; поперек волокон, в направлении касательной к годовым кольцам (в тангентальном направлении), достигают величины  $\alpha_t = 10-15\%$ , а в радиальном направлении они ( $\alpha_r$ ) примерно в два раза меньше.

На основании изложенного В. Н. Быковский (1952), используя работу А. В. Гадолина, выяснил характер распределения коэффициента

усушки  $\alpha$  в зависимости от угла наклона годовых слоев к пласти доски, согласно обычной формуле теории упругости, по которой подсчитывают деформации в любом направлении под углом к осям координат.

Далее В. Н. Быковский отмечает, «что все эти элементарные деформации усушки приводят к искажению формы сечения доски, то есть к ее короблению по некоторой поверхности довольно сложного очертания». Учитывая, что коэффициент усушки по толщине доски меняется линейно от пласти к пласти, можно считать, что величина коробления определяется как разность средних деформаций обеих пластей, а искривление линий поперечного сечения происходит по окружности.

Приводимые соображения о деформации от усушки различно выпиленных заготовок дают возможность представить характер распределения внутренних напряжений как поперек, так и вдоль заготовки и даже оценить их величину.

Одним из наиболее распространенных методов определения характера внутренних напряжений в древесине при сушке является метод силовых секций, заключающийся в наблюдении за изменениями формы зубцов образца, изготовленного из испытуемого материала. Этот метод позволяет определить только характер внутренних напряжений и, в некоторых случаях, весьма приближенно — их относительную величину. Метод не дает точного определения величины внутренних напряжений, однако привлекателен своей простотой.

Рядом авторов предпринимались попытки установления предельного градиента влажности на основе учета величины внутренних напряжений и влагопроводности древесины, но результаты эксперимента не подтвердили этой зависимости. Однако в литературе отмечается, что, вследствие наличия градиента влажности по сечению заготовок, при сушке появляются внутренние напряжения в древесине, которые увеличиваются с увеличением сечения заготовок при наличии большого градиента влажности.

Практики, на основании ряда исследований, применяют метод выдерживания материала в конце сушки, то есть выравнивание влажности по всему сечению.

Характер распределения градиента влажности по сечению заготовки представляется параболической зависимостью.

Величина градиента влажности зависит от размеров заготовки и распространяется по ширине, толщине и длине заготовки. Н. С. Селюгин отмечает, «что внутренние напряжения в любых деталях имеются, и распределение их происходит как вдоль волокон по длине, так и поперек волокон по ширине и толщине детали» (Н. С. Селюгин, 1936).

Из своих исследований внутренних напряжений в древесине, возникающих при усушке, проф. Н. Н. Чулицкий делает вывод, что деформации усушки зависят от величины усилия, под воздействием которого находится заготовка. Они уменьшаются при растяжении и увеличиваются при сжатии. Величина этих изменений пропорциональна величине напряжений (Н. Н. Чулицкий, 1938).

Исходя из зависимостей, установленных Н. Н. Чулицким, В. Н. Быковский, математически исследуя процесс деформирования заготовки, представляет коэффициент усушки в виде:

$$\alpha = \alpha_0 (1 - \kappa_1 \sigma)$$

где:  $\alpha_0$  — коэффициент усушки в свободных условиях, то есть при  $\sigma=0$ ;

$\kappa_1$  — коэффициент пропорциональности;

$\sigma$  — напряжение сжатия при растяжении.

На основании отмеченных работ, а также большого количества экспериментального материала по затронутому вопросу, полученного как у нас, так и за рубежом, мы делаем вывод, что все исследователи подошли к вопросу о причинах возникновения внутренних напряжений в древесине односторонне, так как в них не содержится попыток объединения и комплексного объяснения всех возможных факторов, вызывающих возникновение внутренних напряжений в древесине. Для решения вопроса о действительных суммарных внутренних напряжениях и возможных деформациях деталей, необходимо в каждом конкретном случае оценивать влияние двух основных факторов, а именно:

а) явления усушки древесины;  
 б) анатомического строения древесины. При этом следует учитывать, что напряжения, вызываемые каждым из этих факторов, будут или накладываться друг на друга (суммироваться), или уничтожать друг друга (частично или полностью), или будет сказываться влияние только одного из факторов, в зависимости от размеров доски, местоположения ее в бревне, характера обработки, технологии, режима сушки и пр.

Итак, на величину внутренних напряжений оказывают влияние следующие факторы:

- 1) порода древесины,
- 2) положение доски в бревне,
- 3) направление годичных слоев,
- 4) возраст дерева,
- 5) характер обработки,
- 6) наличие пороков,
- 7) форма и размеры заготовок,
- 8) условия местопроизрастания дерева,
- 9) процент влажности (в пределах до точки насыщения волокон),
- 10) анатомическое строение древесины,
- 11) режим и технология сушки,
- 12) состояние сушильного хозяйства,
- 13) местоположение досок или заготовок в штабеле,
- 14) состояние прокладок.

Наши наблюдения на производстве и в процессе экспериментов показали, что наличие внутренних напряжений в древесине обуславливает деформации при обработке заготовок, то есть коробление древесины.

Отметим некоторые из них:

а) При выходе сырых досок из рамы, вследствие наличия поперечных напряжений в них, образуются деформации (утоление кромок), искажающие истинные размеры толщины досок на 1—2%.

б) Вследствие внутренних напряжений сырые доски растрескиваются по торцам (это особенно заметно у сердцевинных и центральных досок) ввиду наступления после распиловки бревна равновесного напряжения. Если отпилить (оторцевать) от доски концы с трещинами, не захватив их целиком, то концевые трещины будут распространяться дальше до наступления нового равновесия напряжений.

в) В лыжном производстве наличие в древесине внутренних напряжений используется для образования естественного весового прогиба; в качестве скользящей поверхности лыжи применяется сторона бруска, обращенная к периферии.

г) Максимальное поперечное напряжение (деформация по кромке) имеют резонансовые пиломатериалы, выпиливаемые радиально, у которых вследствие появления кривизны по кромке, уменьшается выход длинномерных резонансовых дощечек.

д) При распиловке толстых досок на тонкие и узкие, дощечки, как правило, имеют заметную кривизну по кромкам или пласти, обусловленную действием напряжений.

е) При распиловке в каждой из вновь образованных заготовок растянутые внутренние пласти (поверхности) получают возможность деформироваться под влиянием имеющихся в них напряжений.

ж) При односторонней строжке на фуговальных станках внутренние растянутые слои, обращенные в сторону снятого слоя, получают возможность сжаться, и заготовка коробится вогнутостью в сторону, подвергнутую строжке. При последней обработке этих заготовок на рейсмусовом станке абсолютная стрела прогиба (коробленность) или вообще исчезает, или намного уменьшается.

з) Строганая (ножевая) фанера, получаемая без проварки бревна, не лишена напряжений, в результате чего листы толщиной от 0,5 до 2,0 мм деформируются, принимая корытообразную форму, что особенно наглядно видно при тангентальном строгании (ванчеса), а при радиальном строгании появляется кривизна по кромке.

В результате обработки большого объема экспериментального материала установлено:

1. Следует различать внутренние напряжения в древесине: продольное, поперечное по ширине и поперечное по толщине. Все эти внутренние напряжения являются функциями сечения заготовок.

2. Для заготовок длиной 2000 мм с увеличением ширины стрела прогиба продольного и диагонального короблений уменьшается, а поперечного коробления — увеличивается. Это наглядно доказывает интенсивное влияние продольного внутреннего напряжения и пассивное влияние поперечного внутреннего напряжения в заготовках данной длины.

3. Для заготовок длиной 1000 мм с увеличением ширины стрела прогиба продольного, поперечного и диагонального короблений увеличивается. Здесь влияние поперечного внутреннего напряжения более интенсивно, чем продольного.

4. Для заготовок длиной 800 мм с увеличением ширины стрела прогиба продольного коробления уменьшается, а диагонального и поперечного короблений увеличивается, что подтверждает очевидность интенсивного влияния продольного внутреннего напряжения и пассивность поперечного.

5. Для заготовок длиной 1000 мм с увеличением толщины стрела прогиба продольного, диагонального и поперечного короблений уменьшается. Подобная закономерность наглядно показывает интенсивное влияние продольного и поперечного внутренних напряжений.

Здесь необходимо отметить, что полученные нами выводы о влиянии градиента влажности по сечению заготовок при сушке, не совпадают со взглядами многих авторов на этот вопрос, — они указывают на то, что внутренние напряжения возрастают с увеличением сечения (толщины) заготовок.

6. Для заготовок длиной 800 мм с увеличением толщины стрела прогиба поперечного и диагонального короблений уменьшается, а продольного коробления увеличивается. Здесь влияние поперечного внутреннего напряжения более интенсивно, а влияние продольного внутреннего напряжения более пассивно.

7. С увеличением длины заготовок стрела прогиба продольного, поперечного и диагонального короблений увеличиваются, что наглядно показывает закономерность влияния продольного внутреннего напряжения.

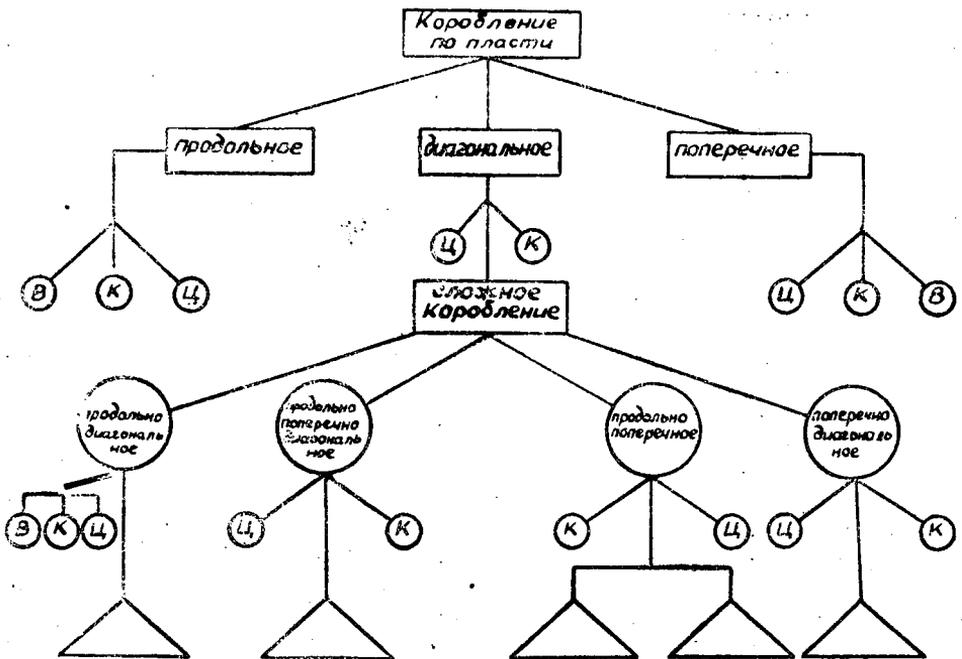


Рис. 1. Классификация коробления заготовок по пласти.

в — волнообразное коробление; ц — центральное коробление; к — концевое коробление;  $\Delta$  — коробление с разносторонней выпуклостью.

Величина коробления и характер его распространения в основном зависит от формы и размеров заготовки. Как было отмечено, в ряде случаев влияние указанных факторов бывает весьма разнообразным, в результате чего характер и размеры коробления не всегда подчиняются закономерностям, установленным упомянутыми авторами.

Мы не имели возможности полностью классифицировать характер распределения коробления заготовок как по пласти, так и по кромке, но, несмотря на это, предлагаемая классификация сложного коробления заготовок по пласти (рис. 1) достаточно убедительно свидетельствует о том, что при рассмотрении вопроса внутренних напряжений необходимо учитывать в единстве и во взаимозависимости все факторы, влияющие на возникновение внутренних напряжений.

В самом деле, явления сложного коробления, особенно коробления с разносторонней выпуклостью, с достаточной убедительностью показывают сложный характер распределения внутренних напряжений. Не вызывает сомнения, что такое коробление есть следствие влияния совокупности факторов. Действие одного из основных факторов, то есть явления усушки или анатомического строения древесины, не могло бы вызвать сложного коробления.

Опыт «пометки» живого дерева углеродом  $C^{14}$ , осуществленный доктором Л. Р. Митчеллом (Штат Нью-Джерси, США), дает нам право высказать предположение, что если осуществить впрыскивание радиоактивного углерода в ствол растущего дерева от периферии к центру у комлевой части или у стрессевого корня, то распространившиеся по всему дереву радиоактивные «меченые» атомы в дальнейшем, после рубки дерева, сохраняются в бревне (хлысте).

При последующей механической обработке бревен появится воз-

можно рассмотреть и установить степень и характер распределения «меченых» атомов как по бревну, так и по доскам, что, в свою очередь, может дать возможность наблюдать характер распределения внутренних напряжений в бревне и в различных сортаментах как на начальных, так и на последующих технологических этапах обработки древесины и даже в столярных изделиях.

Благодаря этому появятся достоверные предпосылки к установлению степени влияния ранее перечисленных факторов на возникновение внутренних напряжений в древесине, и представится возможность достаточно убедительно охарактеризовать внутренние напряжения качественно и количественно.

В заключение следует отметить, что настоящая статья частично дополняет имеющиеся исследования по внутренним напряжениям в древесине и открывает широкие возможности для дальнейших исследований этого актуального вопроса.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Быковский В. Н. «Дополнительные напряжения в новых клееных деревянных конструкциях». Диссертация. (МИСИ) 1952. Витман Ф. Ф. «Остаточные напряжения». Л., 1933. Гадолин А. В. Курс «Технология дерева». Литограф., СПб., 1873. Кузнецов А. И. «Внутренние напряжения в древесине». Гослесбумиздат, М.-Л., 1950. Раздорский В. Ф. «Теория пружин изгиба на службе строительной механики растений». Изв. 2-го Северо-Кавказского педагогич. инст., т. IX, 1932. Селюгин Н. С. «Сущность древесины». Гослестехиздат, Л., 1936. Чулицкий Н. Н. «Исследование внутренних напряжений в древесине». Сборник ВИАМ № 13, 1938.

Поступила в редакцию  
30 ноября 1957 г.