

ARCHITECTURE

Способ определения упруго-пластических характеристик цельной и клееной древесины на образцах конструктивных размеров при сжатии

С. С. Гомон*, Н. В. Полищук

Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина

*Corresponding author. E-mail: s.s.homon@nuwm.edu.ua

Paper received 27.07.18; Accepted for publication 03.08.18.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-179VI21-04>

Аннотация. Проведен анализ существующих способов по определению модуля упругости древесины. Изложены методика и результаты натурных экспериментально-теоретических исследований образцов в виде призм из целой и клееной древесины при продольном сжатии. Разработан новый способ определения упруго-пластических характеристик цельной и клееной древесины при сжатии. Проанализированы полученные данные и обобщены результаты исследований по определению модуля упругости E_0 , упруго-пластичности E и коэффициента упругости ν древесины.

Ключевые слова: цельная древесина, клееная древесина, деформативность, модуль упругости.

Введение. В связи с постепенным переходом стран постсоветского пространства к внедрению расчетных деформационных методов расчета строительных конструкций проблема исследования состояния древесины под нагрузкой в сжатых, растянутых, изгибаемых элементах конструкций в последние годы приобретает все больший интерес ученых. С использованием полной диаграммы деформирования материала появилась возможность определить напряженное состояние в этих конструкциях от начала нагружения до полного разрушения.

Краткий обзор публикаций. В 1846 году Шевальдь и Вертгейм впервые опубликовали результаты обширного исследования упругой анизотропии древесины [1, 2]. Они исследовали 94 дерева различных пород по установлению модуля упругости и скорости прохождения звука вдоль волокон.

Из шестнадцати выводов наиболее значимы:

- остаточные деформации всегда измеримы, даже при сравнительно небольшой полной деформации;
- модуль упругости маленьких образцов соответствует модулям больших образцов, взятых у того же дерева;

- модули упругости и прочность увеличиваются в одинаковой степени с возрастом дерева;

- место, из которого взят образец, вдоль ствола или вдоль радиуса среза, оказывает влияние на модуль упругости и прочность, которые уменьшаются с удалением от оси ствола или с высотой.

Практически эти выводы имеют большое значение и в наши дни. Но экспериментальные и теоретические исследования, проводимые до 1950 года, не имели определенных стандартов на проведение испытаний.

Наибольший интерес к вопросам прочности и деформативности древесины имеют исследования, проводимые в период с 50-х по 70-е годы двадцатого столетия и возобновленные в 90-е годы. Были приняты ГОСТы по определению модуля упругости древесины на малых образцах, например, при сжатии ГОСТ 21523.8-77, изгибе – ГОСТ 21523.7-77, растяжении – ГОСТ 21523.9-77. При этом расчетное поперечное сечение принимали: для изгиба 15x15 мм; для сжатия 30x30 мм; для растяжения 4x20 мм. Во всех случаях

при испытаниях малых образцов сначала загружают до определенной нагрузки, делают выдержку и нагрузку доводят до верхней границы. Загрузку – разгрузку повторяют шесть раз. Модуль упругости определяют:

при изгибе

$$E = \frac{0,2U^2(P_b - P_n)}{bh^3 f}; (1)$$

при сжатии

$$E = \frac{l(P_b - P_n)}{bh(l_{P_2} - l_{P_1})} \cdot 10^{-6}; (2)$$

при растяжении

$$E = \frac{l(P_b - P_n)}{bh(l_{P_2} - l_{P_1})} \cdot 10^{-6}, (3)$$

где f и $\Delta l = (l_{P_2} - l_{P_1})$ определяют как среднее из трёх последних циклов.

Такой методикой пользуются и в наше время [3].

Но Знаменский Е.М. [3] изучая влияние размеров образца на модуль упругости, сделал вывод, что наибольшее влияние неоднородности наблюдаются на малых образцах, где получен наибольший разброс данных в отношении упругих свойств. Кроме этого на маленьких образцах не учитывается макроструктура строения древесины и результаты испытаний неполны.

Устойчивые значения модуля упругости для изгибаемых элементов при различных отношениях l/h с включением достаточного количества структурных элементов древесины наступает для нормальных поперечных сечений не менее 4,5 x 4,5 см. Можно говорить, что такие размеры образца из древесины включают в себя и микроструктуру строения древесины, и макроструктуру – годовые кольца, клеевые швы и так далее. Образцы из цельной или клееной древесины таких размеров можно квалифицировать как конструктивные.

Тутурин С.В. [4] по итогам своих исследований установил, что минимальное соотношение l/h для изгибаемых элементов должно быть в диапазоне 5-6. В немецких стандартах на проведение экспериментов по определению вязкости разрушения при изгибе

методами механики разрушения отношение l/h принимается 6 [5].

Определение модуля упругости древесины в изгибаемых элементах Сухарев И.П. [5] предлагает устанавливать раздельно для сжатой и растянутой зон по соответствующим формулам:

$$E_x^+ = \frac{M}{W} \cdot \left(\frac{\varepsilon_t + \varepsilon_c}{2\varepsilon_t^2} \right), \quad (4)$$

$$E_x^- = \frac{M}{W} \cdot \left(\frac{\varepsilon_t + \varepsilon_c}{2\varepsilon_c^2} \right), \quad (5)$$

где M - разрушающий момент от внешних нагрузок, кНсм; W - момент сопротивления образца, см³;

$\varepsilon_t, \varepsilon_c$ - фибровые относительные деформации в растянутой и сжатой зонах при одном уровне нагрузки, 10⁵.

Среднее значение определяют из условия

$$E = \frac{E_x^+ + E_x^-}{2}. \quad (6)$$

В работах Thunel В., Тарнопольского Ю.М., Деловой М.И. [7,8,9] модуль упругости древесины для изгибаемых элементов рекомендуется определять по методике измерений разности прогибов на участке чистого изгиба с $M = \text{const}$

$$E_x = \frac{Fl_p^3}{548I_x(f_c - f_M)}, \quad (7)$$

где f_c - прогиб балки в середине пролёта, см; f_M - прогиб балки в месте приложения сосредоточенной нагрузки, см; l_p - расчетный пролёт балки, см; F - расчетная сосредоточенная нагрузка, кН; I_x - момент инерции сечения балки, см³.

Цель. Целью статьи является усовершенствование методики определения упруго-пластических характеристик цельной и клееной древесины.

Материалы и методы. Объектом исследования являются образцы из цельной и клееной древесины конструктивных размеров, которые включают в себя как микроструктуру так и макроструктуру дерева для определения упруго-пластических характеристик материала.

Результаты и обсуждение. Так как, стандартные методы определения модуля упругости базируются на испытаниях образцов с маленьким рабочим сечением и образцы подвергаются шестикратному нагружению-разгрузке в пределах 2,5-10 МПа, то необходимо отметить тот факт, что маленькое сечение не обладает необходимым составом макроструктурных элементов древесины, а режим испытаний приводит к внутреннему напряженному состоянию материала. Это дает побочные влияния на упругие свойства и прочность, а также приводит к их искаженным и значениям.

Тутурин С.В. [4] рекомендует определять модуль упругости по углу наклона касательной к кривой “ $\sigma - \varepsilon$ ” на упругом участке деформирования. Однако на типичной диаграмме “нагрузка – перемещение прессы” при жестком режиме загрузки условно прямолинейная часть, после начального искривления, по данным автора, начинается приблизительно от 9 МПа и продолжается до 33 МПа. На диаграмме видно суще-

ственное влияние краевых эффектов – неточностей в изготовлении, дефектов при обработке торцевых поверхностей и повреждений в этих частях микро- и макроструктуры древесины. Поэтому, для устранения этих недостатков необходимо, определять относительные деформации древесины, а не перемещения траверсы прессы при жестком режиме загрузки образцов.

Как показывают многочисленные опыты [10, 11, 12, 13], зависимость «напряжение – деформации» ($\sigma - u$) при сжатии древесины вдоль волокон призматических образцов размерами поперечного сечения не менее 40x40 мм с постоянной скоростью прироста деформаций (жесткий режим) или с постоянной скоростью прироста нагрузки (мягкий режим) вследствие проявления пластических деформаций, возникающих при самых малых напряжениях, является нелинейной с начала загрузки. С ростом уровня напряжений искривление восходящей ветви диаграммы сжатия ($\sigma - u$) увеличивается. Подтверждение этому выводу проведем с помощью секущего модуля упруго-пластичности древесины при сжатии вдоль волокон, который определяем как угол наклона секущей кривой “ $\sigma - u$ ” к оси “ u ” [4]:

$$E' = tg\alpha' = \frac{\sigma}{u_{c,d}}. \quad (8)$$

Для мягкого режима приложения нагрузки к образцам модуль упруго-пластичности древесины вдоль волокон E' имеет линейную зависимость от напряжений σ (см. табл.1), а также скорости приложения нагрузки.

Модуль упругости древесины E_o можно определить как тангенс угла наклона касательной к кривой “ $\sigma - u$ ” на участке деформирования в начале координат, когда $\sigma \rightarrow 0$ и $u \rightarrow 0$, тогда касательная к кривой примет предельное положение секущей

$$E_o = tg\alpha_o = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{\sigma}{u_{c,d}} = \lim_{\sigma \rightarrow 0} tg\alpha = \lim_{\sigma \rightarrow 0} E'. \quad (9)$$

Значение E_o или угол α_o установить по опытной кривой “ $\sigma - u$ ” невозможно без аналитического установления ее выражения. Только при малых значениях напряжений возможно наибольшее приближение секущего модуля упруго-пластичности E' к модулю упругости E_o . Но, в этом случае, малым значениям напряжений соответствуют малые деформации, а при применении измерительных приборов с ценой деления 0,001 мм и базой 100 мм погрешность в оценке деформаций древесины при $\sigma = 0,1f_{c,0,d}$ и $u = 4 \cdot 10^{-5}$ составит

$$\frac{1 \cdot 0,001}{100 \cdot 4 \cdot 10^{-5}} \cdot 100 = 25\%.$$

Такая же погрешность будет при использовании тензодатчиков и это приводит к большим неточностям при определении начального модуля упругости.

Проведенные нами опыты показали, что при нелинейной зависимости ($\sigma - u$) зависимость “напряжение - секущий модуль упругости” ($\sigma - E'$) при сжатии древесины вдоль волокон, загруженной с постоянной

скоростью прироста нагрузки или деформаций на восходящей ветви диаграммы, является линейной

$$E' = \frac{\sigma}{u_{c,d}} = E_0 - \frac{E_0 - E_{f_{c,0,d}}}{f_{c,0,d}} \cdot \sigma. \quad (10)$$

Эта зависимость имеет линейный характер при испытании на сжатие вдоль волокон подавляющего большинства образцов из цельной и клееной древесины сосны не имеющих пороков. Экспериментально установлено, что линейная зависимость ($\sigma - E'$) путем экстраполяции дает возможность с помощью математической статистики установить аналитически (табл.1) или графически (рис.1) значение начального модуля упругости древесины вдоль волокон E_0 . Значение E_0 определится как предельное значение секущего модуля упруго-пластичности E' при $\sigma = 0$. Таким же способом устанавливается при принятой скорости приложения нагрузки предельный модуль упруго-пластичности $E'_{f_{in,d}}$, предельные деформации сжатия $u_{c,f_{in,d}}$ при $\sigma = f_{c,0,d}$:

Таблица 1. Основные параметры и статистики корреляционных уравнений регрессии « $E' - \eta$ » призм из цельной и клееной древесины

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	$\frac{r}{m_r}$	$V, \%$
ПЦ-1	$E' = 12,858 \cdot (1 - 0,056 \cdot \eta)$	0,959	0,024	40	1,13
ПЦ-2	$E' = 15,446 \cdot (1 - 0,133 \cdot \eta)$	0,840	0,089	9	4,75
ПЦ-3	$E' = 15,024 \cdot (1 - 0,107 \cdot \eta)$	0,984	0,009	104	1,12
ПЦ-4	$E' = 15,467 \cdot (1 - 0,060 \cdot \eta)$	0,977	0,014	71	0,71
ПЦ-5	$E' = 14,121 \cdot (1 - 0,068 \cdot \eta)$	0,998	0,001	734	0,27
ПЦ-6	$E' = 12,702 \cdot (1 - 0,070 \cdot \eta)$	0,994	0,004	283	0,53
ПЦ-7	$E' = 11,801 \cdot (1 - 0,030 \cdot \eta)$	0,725	0,143	5	1,93
ПК-1	$E' = 19,563 \cdot (1 - 0,087 \cdot \eta)$	0,902	0,056	16	3,67
ПК-2	$E' = 15,848 \cdot (1 - 0,055 \cdot \eta)$	0,930	0,041	23	2,42
ПК-3	$E' = 17,543 \cdot (1 - 0,053 \cdot \eta)$	0,861	0,078	11	2,94
ПК-4	$E' = 23,140 \cdot (1 - 0,102 \cdot \eta)$	0,894	0,061	15	3,74
ПК-5	$E' = 15,716 \cdot (1 - 0,032 \cdot \eta)$	0,743	0,135	5,5	0,78

$$u_{c,f_{in,d}} = \frac{f_{c,f_{in,d}}}{E'_{f_{in,d}}}. \quad (11)$$

Поскольку между напряжениями и упругими деформациями материалов есть линейная зависимость

1. Chevandier E. Memoire sur les proprietes mecaniques des bois/ E.Chevandier, G. Werthtim/ -Paris: 1848.
 2. Chevandier E. Proprieties mecaniques des bois/ E.Chevandier, G. Werthtim/ - Paris: 1861.
 3. Знаменский Е.М. Несущая способность элементов деревянных конструкций при статическом и динамическом нагружении / Е.М. Знаменский.- М.: 1956.
 4. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины/Сергей Викторович Тутурин/ Дис. д. т. н. - М.: МГУ, 2005. - 318с.

$$\sigma = u_{el,c,d} E_0. \quad (12)$$

В то же время, исходя из (8) существует и зависимость

$$\sigma = u_{c,d} E'. \quad (13)$$

Приравняв эти два выражения, получим

$$\sigma = u_{el,c,d} E_0 = u_{c,d} E'. \quad (14)$$

При этом можно определить коэффициент упругости древесины V :

$$V = \frac{u_{el,c,d}}{u_{c,d}} = \frac{E'}{E_0}. \quad (15)$$

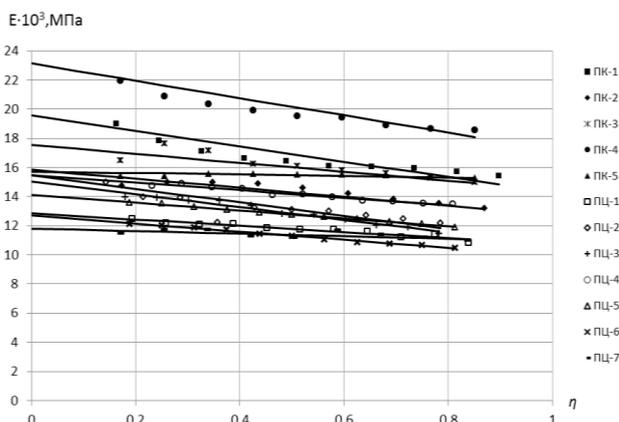


Рис.1. Диаграммы изменения секущего модуля упруго-пластичности древесины при сжатии вдоль волокон цельной и клееной древесины при действии кратковременной нагрузки

Модуль упруго-пластичности древесины E в любой точке восходящей ветви диаграммы деформирования при продольном сжатии определится

$$E = vE'. \quad (16)$$

При испытаниях образцов из древесины конструктивных размеров [14, 15], наиболее простым есть ступенчатое однократное кратковременное приложение нагрузки с какой-либо произвольной скоростью при продольном сжатии или поперечном изгибе.

Выводы. Разработано методику достоверной оценки модуля упругости E_0 , коэффициента упругости v и модуля упруго-пластичности E древесины на образцах конструктивных размеров. Это дало возможность быстро их определять и использовать при решении практических задач по расчету деревянных конструкций с применением деформационной методики.

ЛИТЕРАТУРА

5. Сроули Д. Методы испытаний на вязкость разрушения / Д.Сроули, У. Браун // Прикладные вопросы вязкости разрушения. - М.: Мир, 1968. - С.213-297.
 6. Сухарев И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности / И.П. Сухарев.- М.: Машиностроение, 1987.- 216 с.
 7. Thunel B. On the Premises for Mechanical grading of Timber /B. Thunel// Paperi ja puu, 1969. - teos 51- №4. - P. 373-377.
 8. Гарнопольский Ю.М. Методы статических испытаний пластиков / Ю.М. Гарнопольский, Т.Я. Киндис. - М.: Химия, 1975. - 264 с.

9. Делова М.И. Деформирование изгибаемых клееных деревянных элементов при статическом нагружении: дис. к.т.н.: спец. 05.23.01 / Маргарита Ивановна Делова/ - Курск, 2001. -165с.
10. Копаница Д.Г. Определение коэффициента постели для расчета узлового соединения элементов из древесины на МЗП/ Копаница Д.Г., Лоскутова Д.В., Савченко В.И., Пляскин А.С.. - Вестник ТГАСУ.- №2, Томск: ТГАСУ, 2011. - С.79-88.
11. Гомон С.С. Діаграма механічного стану деревини сосни за одноразового короткочасного деформування до повної втрати міцності матеріалу/ С.С. Гомон, С.С. Гомон, Т.А. Сасовський// 36. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.- Вип. 23 Рівне, НУВГП, 2012. - С. 166-171.
12. Гомон С.С. Построение полной диаграммы деформирования древесины сосны при действии статической нагрузки / С.С. Гомон, С.С. Гомон, Т.А. Сасовський// Сборник научных трудов "Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии". ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». Часть 2. Могилев, 2012.- С. 81-82.
13. Гомон С.С. Работа изгибаемых элементов из клееной древесины при малоцикловых нагрузках/ С.С. Гомон, Т.А. Сасовський // Вестник Белорусско-Российского университета, в.1(50), Могилев, УПКП МЭУП, 2016.-С. 130-139.
14. Gomon S. Study on working peculiarities of glue laminated beams under conditions of slanting bending/ S. Gomon, A. Pavluk //Underwater technologies, Vol. 07, 2017.-P. 42-48.
15. Гомон С.С. Експериментально-статистичні дослідження залежностей «січний модуль-рівень напружень» для цільної та клеєної деревини/ С.С. Гомон, М.В. Поліщук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. - Випуск 35. - Рівне, 2018. - С.60-67.

REFERENCES

1. Chevandier E. Memorie sur les proprietes mecaniques des bois/ E.Chevandier, G. Werthtim/ -Paris: 1848.
2. Chevandier E. Proprietes mecaniques des bois/ E.Chevandier, G. Werthtim/ - Paris: 1861.
3. Znamenskiy Ye.M. Bearing capacity of elements of wooden structures under static and dynamic loading / E.M. Znamenskiy, Moscow: 1956.
4. Tuturin S.V. Mechanical strength of wood / Sergey Viktorovich Tuturin / Dis. d. to. - Moscow: Moscow State University, 2005. - 318 p.
5. Srouli D. Test methods for the fracture toughness / D.Srouli, U. Braun // Applied Problems of the Viscosity of Fracture, M.: Mir, 1968.-P.213-297.
6. Sukharev I.P. Experimental methods of investigation of deformations and strength. Sukharev. - M.: Mechanical Engineering, 1987.- 216 p.
7. Thunel B. On the Premises for Mechanical grading of Timber /B. Thunel// Paperi ja puu, 1969. - teos 51- №4. - P. 373-377.
8. Tarnopol'skiy YU.M. Methods of static testing of plastics / Yu.M. Tarnopol'skiy, T.YA. Kintsis. - Moscow: Chemistry, 1975. -264 p.
9. Delova M.I. Deformation of bent glued wood elements under static loading: dis. Cand.Sc.: special. 05.23.01 / Margarita Ivanovna . Delova / - Kursk, 2001. -165p.
10. Kopanitsa D.G. Determination of the bed coefficient for the calculation of the nodal connection of elements from wood to MZP / D.G. Kopanitsa, D.V. Loskutova, V.I. Savchenko, A.S. Plyaskin. - Bulletin of TGASU. - №2, Tomsk: TGASU, 2011 - P.79-88.
11. Gomon S.S. The diagram of mechanical condition of wooden pine tree one-time used and short-term deformation to the full loose of the material's strength / S.S. Gomon, S.S. Gomon, T.A. Sasov'skiy // Sb. Resource-saving materials, constructions, buildings and constructions. -Vip. 23 Rivne, NUVGP, 2012. - P. 166-171.
12. Gomon S.S. Construction of a complete diagram of pine wood deformation under the action of a static load / C.C. Gomon, S.S. Gomon, T.A. Sasovskiy // Collected scientific works "Materials, equipment and resource-saving technologies". The Belarusian-Russian University. Part. Mogilev, 2012.- P. 81-82.
13. Gomon S.S. The work of bent elements from glued wood with low cyclic loads / C.C. Gomon, T.A. Sasovskiy // Bulletin of the Belarusian-Russian University, p.1 (50), Mogilev, UPKP MEUP, 2016.- S. 130-139.
14. Gomon S. Study on working peculiarities of glue laminated beams under conditions of slanting bending/ S. Gomon, A. Pavluk //Underwater technologies, Vol. 07, 2017. - P. 42-48.
15. Gomon S.S. An experimental and statistical investigation of "modulus elastisiti – stress level" dependencies of solid and glued timber / S.S. Gomon, M.V. Polischuk // Resursoeconomni materials, constructions, budivlty spores. Zbirnik naukovykh prat. - Vypusk 35. - Rivne, 2018. - P.60-67.

Method of Determination of Solid and Glued Wood Elastic-Plastic Characteristics on Specimens of Structural Dimensions under Compression

S. S. Gomon, M. V. Polishchuk

Abstract. An analysis of existing methods for determining the elastic modulus of wood is carried out. The method and results of full-scale experimental and theoretical researches of specimens in the form of prisms made of solid and glued wood under longitudinal compression are described. A new method for determining the elastic-plastic characteristics of solid and glued wood under longitudinal compression is developed. The obtained data have been analyzed and generalized research results for determining the elastic modulus.

Keywords: solid wood, glued wood, deformability, elastic modulus.