

А. Д. ЩЕРБО¹,
Е. А. МОЙСЕЙЧИК¹, *д-р техн. наук, проф.*
А. А. ЯКОВЛЕВ²,
Д. И. КРАВЧЕНКО²,

¹Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

²ООО «СИМТЕХ» (Минск, Беларусь)

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦИФРОВКИ И СТАДИЙНОГО АНАЛИЗА ДИАГРАММ КРАТКОВРЕМЕННОГО СЖАТИЯ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

Аннотация. Разработан алгоритм автоматической обработки экспериментальных данных, позволяющий извлекать и анализировать диаграммы деформирования, выполнять их сегментацию с учетом фактических характеристик испытываемых деревянных образцов (два типоразмера 60 и 120 мм). Установлено, что модуль Юнга сосны вдоль волокон составляет 12,8 ГПа, предел прочности при сжатии – $40,6 \pm 4,7$ МПа, а полная удельная работа деформации достигает 6,0 МДж/м³. Автоматизация сокращает трудоёмкость обработки данных, позволяя получать достоверные результаты.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сжатие вдоль волокон, диаграмма деформирования, модуль упругости, предел пропорциональности, касательный модуль упругости, удельная работа деформации, автоматизация.

Введение. Древесина как конструкционный анизотропный материал широко применяется в строительстве, особенно в регионах с развитой лесоперерабатывающей промышленностью. При проектировании несущих деревянных конструкций (колонн, балок, арок) важное значение имеют прочностные и деформативные характеристики материалов при сжатии вдоль волокон. Согласно ГОСТ 16483.10–73 [1] оценка качества древесины при этом ограничивается фиксацией разрушающей нагрузки. Однако такой подход не позволяет получить достаточную информацию о поведении анизотропного материала вплоть до его разрушения [2, 3].

Современные испытательные машины, например Zwick с ПО «TestXpert II», регистрируют точки диаграммы с высокой частотой. Экспериментальные данные фиксируются и сохраняются в проприетарном (скрытом от пользователя) формате. В инженерную практику, как правило, переносятся лишь итоговые значения разрушающей силы. Кроме того, измеряемое перемещение траверсы состоит из перемещения образца и дополнительных перемещений силовой рамы, захватов и обмятия торцов. При этом, дополнительные перемещения могут быть сопоставимы с упругими деформациями образца, что приводит к существенному занижению истинного модуля упругости (в 3–4 раза) [4]. Для устранения этого эффекта применяют либо прямые экстензометрические измерения, либо косвенные методы, в частности, испытания образцов разной длины с последующей экстраполяцией податливости [3, 5].

Авторами статьи [6] предложен алгоритм сбалансированной оценки параметров с целью фильтрации инструментальных и методических ошибок, обусловленных дополнительными смещениями в ходе натурных испытаний древесины. Работа базируется на оптимизации функции потерь с регуляризацией, а именно: минимизируя невязку с опытными точками при одновременном ограничении вариативности модели. Автор добивается устойчивых результатов даже в условиях измерений, имеющих шумы.

В отличие от этого подхода, авторами настоящей статьи разработан алгоритм, ориентированный не на выбор модели из параметрического семейства, а на структурный анализ экспериментальной диаграммы деформирования. Вместо поиска неизвестных параметров модели предлагается выполнять поэтапно сегментацию кривой на основе касательного модуля упругости, что допускает количественно оценивать границы перехода материала от упругого поведения к разрушению.

Целью настоящей статьи является разработка и апробирование алгоритма автоматической оцифровки и стадийного анализа диаграмм сжатия сосны вдоль волокон с поправкой на податливость испытательной машины.

Материалы и методика исследования. Объектом исследования служила древесина сосны обыкновенной из лесного массива Минской области. Отбирали прямослойные заготовки без видимых пороков (сучки, трещины, косослой). Изготовлены образцы квадратного сечения 30×30 мм: три длиной 60 мм и три образца длиной 120 мм. Влажность материала составляет (12–15 %). Образцы кондиционировались при 20±2 °С в течение 14 суток. Испытания проводили на универсальной машине «Zwick Z100» с номинальным усилием 100 кН, оснащённой системой автоматической записи данных «TestXpert II». Нагружение выполняли с постоянной скоростью перемещения траверсы 5 мм/мин до разрушения.

Экспериментальные результаты сохранялись в формате «.zs2». Для доступа к временным рядам разработана программа на языке Python с использованием модуля «struct» для побайтового декодирования. Идентификация измерительных каналов (сила, перемещение траверсы, время) проведена на основе анализа заголовков и сверки с текстовым протоколом (.ERG). После обработки формировался массив с дискретностью около 0,1 с (6–9 тыс. точек на образец). Корректность извлечения подтверждена сравнением максимального усилия с протокольным – расхождение не превысило 0,1 %. Напряжения вычислялись как $\zeta = F / A$, где $A = 900 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения.

Для учёта податливости испытательной машины использован стандартный подход, согласно которому деформация силовой рамы линейно зависит от нагрузки [7]. С учётом этого полное перемещение траверсы складывается из деформации машины и деформации образца:

$$\delta_{\text{изм}} = C_m \cdot F + (L_0 / (E \cdot A)) \cdot F, \quad (1)$$

где C_m – податливость силовой рамы (мкм/кН); L_0 – начальная длина образца; E – истинный модуль упругости материала (модуль Юнга).

Суммарная податливость системы $c = \delta_{\text{изм}} / F$ является линейной функцией длины: $c = C_m + L_0 / (E \cdot A)$. Для двух типоразмеров проведена линейная регрессия, по угловому коэффициенту которой определён E , а по свободному члену – C_m . Вычисления реализованы в Python с использованием пакетов NumPy и SciPy.

Обработанную диаграмму ζ – ϵ (с поправкой) анализировали с использованием касательного модуля $E_t = d\zeta/d\epsilon$, вычисляемого методом скользящего окна. Критерии стадий (в соответствии с классификацией, принятой в механике разрушения [2]): 0 (обмятие) – до $F = 0,05 \cdot F_{\text{max}}$; I (линейно-упругая работа) – $E_t \approx \text{const}$, $R^2 > 0,99$; II (зарождение разрушения) – E_t снижается до $0,5 \cdot E$; III (несущая способность) – $E_t = 0$, $d\zeta/d\epsilon = 0$; IV (смятие и разупрочнение): ниспадающая ветвь с локальными сбросами силы более 2 % от F_{max} .

Удельная работа деформации (энергоёмкость) вычислялась численным интегрированием диаграммы методом трапеций как площадь под кривой $\zeta(\epsilon)$.

Результаты экспериментальных исследований. Все образцы разрушились по механизму смятия, без потери устойчивости, что подтверждается слабой корреляцией между ζ_{max} и длиной ($r = 0,07$). В табл. 1 приведены индивидуальные показатели.

Табл. 1 Механические характеристики образцов сосны при сжатии вдоль волокон

№	Метка	L_0 , мм	$\zeta_{\text{пл}}$, МПа	$\epsilon_{\text{пл}}$, %	ζ_{max} , МПа	$\epsilon_{\text{пик}}$, %	$\zeta_{\text{пл}}/\zeta_{\text{max}}$	$W_{\text{пик}}$, кДж/м³	$W_{\text{полн}}$, МДж/м³	Остаточная прочность, %
1	4.4	60	28,8	1,17	32,6	2,45	0,88	510	6,0	75
2	4.8	60	45,2	0,76	47,5	1,14	0,95	230	4,7	82
3	4.12	60	38,5	0,85	40,7	1,26	0,94	245	4,2	86
4	6.1	120	36,0	0,84	39,7	1,37	0,91	310	3,1	80
5	6.2	120	39,9	0,75	42,1	0,99	0,95	191	3,2	80
6	6.4	120	38,5	0,73	40,9	0,96	0,94	172	3,3	81

Средние значения: $\zeta_{\text{max}} = 40,6 \pm 4,7$ МПа (коэффициент вариации 11,5 %). Предел пропорциональности $\zeta_{\text{пл}}$ составил $(0,88–0,95) \cdot \zeta_{\text{max}}$, что указывает на весьма узкий диапазон линейно-упругой работы и раннее начало микропластических деформаций, обусловленных гетерогенностью структуры древесины [3]. Деформации при пике – от 0,96 до 2,45 %. Полная удельная работа деформации до разрушения (энергоёмкость) варьировалась от 3,1 до 6,0 МДж/м³.

На рис. 2 представлены наложенные диаграммы ζ – ϵ для всех образцов. Их форма хорошо воспроизводится, особенно на начальном линейном участке. Применение коррекции по формуле (1) дало истинный модуль упругости $E = 12,8$ ГПа (рис. 3), тогда как без поправки по перемещению траверсы получались «кажущиеся» значения 1,5–3,2 ГПа, что кратно занижает реальную жёсткость материала. Податливость машины составила $C_m = 32,7$ мкм / кН, что

эквивалентно дополнительному перемещению около 1 мм при нагрузке 30 кН – этот эффект нельзя игнорировать при определении упругих констант.

Автоматическая сегментация диаграммы на рис. 4 показывает, что упругая стадия плавно переходит в несущую способность – касательный модуль снижается монотонно, а предел пропорциональности лежит почти под самым пиком. За максимумом идет пологая нисходящая ветвь, на которой видны локальные скачки, порядка 5–8% от максимума, – это как результат накопления повреждений. Остаточная прочность при этом держится на уровне 75–86%, что вполне подтверждает известное: древесина ведет себя как вязкий материал и имеет хороший запас по деформациям [5, 8].



Рис. 1 Испытание образцов

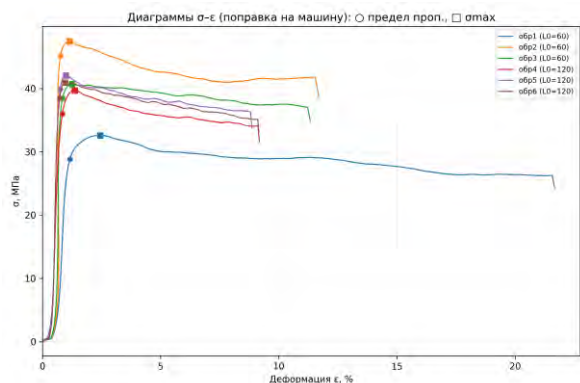


Рис. 2. Диаграммы σ – ϵ шести образцов: ○ – предел пропорциональности, □ – несущая способность

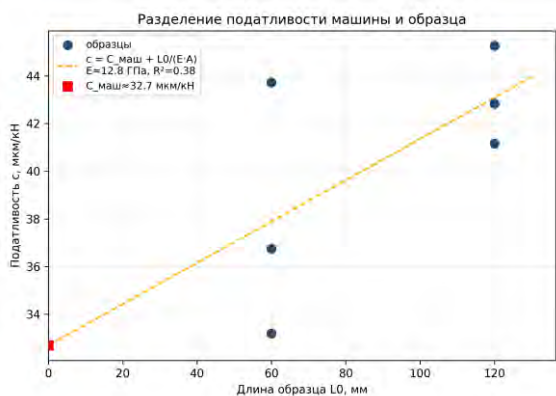


Рис. 3. Разделение податливости машины и образца по двум типоразмерам



Рис. 4. Стадии работы образца под нагрузкой (образец 4.8, $L_0=60$ мм)

Сравнительный анализ полученных данных со справочными [5, 8, 9] показывает хорошую согласованность: для сосны вдоль волокон модуль упругости находится в диапазоне 10–14 ГПа, а прочность – 35–50 МПа. Полученные значения согласуются с данными других исследователей [10, 11]. Как отмечается в работе [12], учёт нелинейных эффектов при деформировании анизотропных материалов позволяет более точно описывать постпиковое поведение, что подтверждается полученными в настоящем исследовании результатами на стадии разупрочнения. Использованный метод разделения податливости не требует дополнительных измерительных приборов и легко

реализуется на испытательной машине, что повышает его инженерную ценность.

С позиций механики деформируемого твёрдого тела, полученные результаты позволяют корректно интерпретировать стадийность процесса. Как отмечает Ю.Н. Работнов [2], диаграмма ζ – ϵ отражает эволюцию дефектной структуры материала. На начальном этапе (стадия I) материал деформируется упруго, затем (стадия II) начинается накопление необратимых повреждений, что сопровождается снижением касательного модуля. Стадия III соответствует образованию макроскладки – локализованной зоны сдвиговых деформаций, характерной для сжатия анизотропных волокнистых материалов. На стадии IV происходит разупрочнение и смятие, при этом остаточная прочность остаётся высокой, что объясняется перераспределением напряжений и вовлечением в деформирование всё новых объёмов материала.

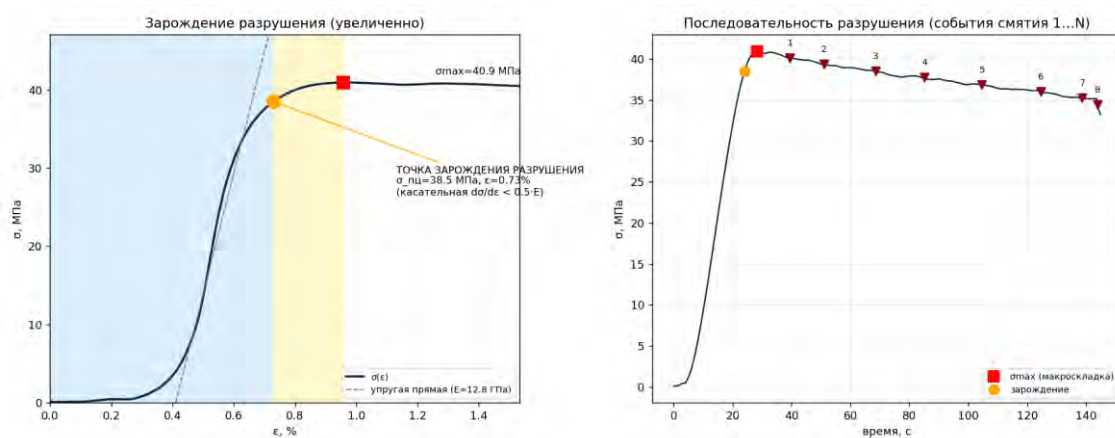


Рис. 5. Точка зарождения разрушения (слева) и последовательность смятия (справа)

Автоматизация сокращает время обработки одного испытания с 20–30 мин (при ручной оцифровке) до нескольких секунд, из процесса исключается субъективизм при определении границ стадии и вычислении производных – для серийных испытаний пилотматериалов в Республике Беларусь это особенно важно.

Заключение. Разработан программный модуль, который извлекает полные определяющие соотношения из бинарных файлов машины Zwick. Расхождение по пиковым усилиям с протокольными данными меньше 0,1%, точность можно считать подтвержденной.

Испытания на образцах двух длин (60 и 120 мм) и линейная регрессия позволили разделить податливость машины и образца. В итоге получили истинный модуль упругости вдоль волокон $E=12,8$ ГПа. Это значение близко к справочным данным и, что характерно, в 4–8 раз выше кажущихся величин, если не вводить поправку на жесткость установки.

Для автоматической сегментации диаграммы на пять стадий деформирования мы задали количественные критерии, опирающиеся на касательный модуль. Предел пропорциональности оказался в диапазоне

(0,88–0,95) $\zeta_{\max}$, а удельная работа разрушения достигает 6,0 МДж/м³ – сосна проявляет себя как неплохой энергопоглотитель.

Предложенная методика рекомендуется для обработки данных испытаний строительных лабораторий и при сертификационных испытаниях.

Список литературы

1. ГОСТ 16483.10–73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 6 с.
2. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие для мех.-мат. и физ. спец. ун-тов / Ю.Н. Работнов. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
3. Александров, А. В. Сопротивление материалов : учебник для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин ; под ред. А. В. Александрова. – М. : Высшая школа, 2009. – 559 с.
4. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1987. – 248 с. – (Теоретическая физика ; т. 7).
5. Wood handbook : wood as an engineering material / Forest Products Laboratory. – General Technical Report FPL-GTR-282. – Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. – 543 p.
6. Соколов, А.В. Выбор математической модели: баланс между сложностью и близостью к измерениям / А.В. Соколов, В.В. Волошинов // Международный журнал открытых информационных технологий – 2018. – Том 6, № 9. – С. 33–41.
7. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002). Пластмассы. Метод испытания на сжатие.– М. : Стандартиформ, 2014. – 24 с.
8. Senalik, C. A. Chapter 5: Mechanical properties of wood / C. A. Senalik, B. Farber // Wood handbook : wood as an engineering material. – General technical report FPL-GTR-282. – Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. – P. 5-1–5-46.
9. Gibson, L. J. Cellular Solids: Structure and Properties / L. J. Gibson, M. F. Ashby. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1997. – 510 p.
10. Mankowski, P. Influence of pine (*Pinus sylvestris* L.) growth rings width on the strength properties of structural sawn timber / P. Mankowski, I. Burawska-Kupniewska, S. Krzosek, M. Grzeskiewicz // BioResources. – 2020. – Vol. 15, No. 3. – P. 5402–5416.
11. Zhao, S. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research / S. Zhao, J. X. Zhao, G. Z. Han // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 137, No. 1. – P. 1–9.
12. Пальмов, В. А. Нелинейная механика деформируемых тел. Термодинамический и энергетический подходы / В. А. Пальмов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2007. – 198 с.

Контакты:

a.cherbo@bntu.by (Щербо Алексей Денисович)
emoisseitchik@mail.ru (Мойсейчик Евгений Алексеевич)
ftkckp@mail.ru (Яковлев Александр Александрович)
ftkckp@mail.ru (Кравченко Дмитрий Игоревич)