

УДК 674.047

DOI: 10.18698/2542-1468-2018-1-94-99

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ

М.Г. Ермоченков, А.Г. Евстигнеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
ermochenkov@mgul.ac.ru

Термическая обработка древесины широко используется для улучшения ее свойств. Одним из видов такой обработки является термическое модифицирование. Термически модифицированная древесина может использоваться в качестве конструкционных и отделочных материалов. Это предполагает наличие информации о ее прочностных свойствах и их зависимости от степени модифицирования. Термическая обработка приводит к деструкции древесины, что сопровождается изменением ее структуры и свойств, в том числе и прочностных. Исследована длительная прочность древесных образцов при сжатии и ее изменение при термическом модифицировании. Материал при термообработке деструктурирует, что является сложным многостадийным физико-химическим процессом. Скорость его протекания определяется кинетическими параметрами термической деструкции, температурой, темпом нагрева и временем теплового воздействия. Приведены результаты экспериментальных исследований длительной прочности древесины при сжатии. Получены соответствующие кинетические параметры. Для определения зависимости кинетики механического разрушения от степени термической деструкции проведена термообработка образцов. Режимы теплового воздействия выбирались таким образом, чтобы термическое разложение древесины происходило с последовательным завершением отдельных стадий. Определена длительная прочность образцов после термообработки, рассчитаны соответствующие кинетические параметры. Предложена математическая модель зависимости длительной прочности древесных образцов при сжатии, учитывающая завершенность отдельных стадий термической деструкции. Она позволяет определять время разрушения образцов древесины сосны в зависимости от нагрузки, а также от интенсивности и времени термического модифицирования. Определены соответствующие коэффициенты, входящие в модель.

Ключевые слова: модифицированная древесина, свойства древесины, длительная прочность, термическая деструкция, кинетические параметры

Ссылка для цитирования: Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Изменение прочностных свойств древесины при термическом модифицировании // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 1. С. 94–99.
DOI: 10.18698/2542-1468-2018-1-94-99

Сейчас все более широкое применение находит термически модифицированная древесина (ТМД). Это связано с ее преимуществами по сравнению с немодифицированной древесиной. ТМД может использоваться в качестве конструкционных и отделочных материалов, что предполагает наличие информации о ее прочностных свойствах.

Цель работы

Цель работы — исследование длительной прочности древесных образцов при сжатии и ее изменение при термическом модифицировании, а также построение математической модели зависимости длительной прочности древесных образцов при сжатии с учетом завершенности отдельных стадий термической деструкции, что позволит определять время разрушения образцов древесины сосны в зависимости от нагрузки, интенсивности и времени термического модифицирования.

Методы и объекты исследования

В настоящее время сложились два основных подхода к описанию прочности материалов, ис-

пытывающих механические нагрузки. При первом деформация и разрушение твердых тел при механических воздействиях описываются методами математической механики. При втором разрушение материалов или объектов из этих материалов рассматривается как кинетический процесс, связанный с их атомарно-молекулярным строением. Объектом изучения становится термофлуктуационный процесс, развивающийся вследствие теплового движения атомов [1–3]. Разрушение твердого тела при механическом нагружении рассматривается как протекающий во времени последовательный разрыв межатомных связей. Долговечность твердого тела под нагрузкой является мерой средней скорости процесса разрушения, связанного с накоплением критического количества повреждений в материале. С.Н. Журковым была предложена формула, связывающая долговечность, напряжение и абсолютную температуру [3]. Для простых напряженных состояний, характеризуемых лишь одной компонентой σ , эта формула имеет вид

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где τ — долговечность, с;

τ_0 — константа, равная периоду тепловых колебаний атомов в твердых телах около положения равновесия, $\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-13}$ с;

U_0 — энергетическая константа материала, совпадающая по значению с энергией распада межатомных связей (энергия активации), Дж/моль;

γ — структурно-чувствительный коэффициент, (Дж·м²)/(моль·Н);

σ — напряжение, Па;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T — абсолютная температура, К.

Приводя выражение (1) к линейному виду и записывая его для i -й точки, получаем систему уравнений

$$\ln\left(\frac{\tau_i}{\tau_0}\right)RT = U_0 - \gamma\sigma_i. \quad (2)$$

Термическая деструкция древесины при модифицировании вызывает изменение состава материала, его пористости и структуры и, как следствие, физических, химических и физико-механических свойств [4–8]. Термодеструкция древесины является многостадийным процессом [9, 10]. Протекание каждой стадии сопровождается разрушением определенной группы физико-химических связей. Это вызывает изменение характеристик материала. Таким образом, для учета влияния степени превращения на длительную прочность ТМД необходимо исследовать влияние каждой стадии на физико-механические свойства.

Результаты и обсуждение

После проведения термогравиметрических исследований термической деструкции материала определяются кинетические параметры, энергия активации E , частотный фактор A и относительная масса стадии ω [9, 11, 12]. В этом случае функция, устанавливающая связь времени до разрушения с нагрузкой и температурой, может быть представлена как алгебраическая сумма функций, учитывающих вклад каждой стадии в изменение свойств материала:

$$F(\tau_p, \sigma, T) = \sum_{i=0}^n f_i(\tau_p, \sigma, T), \quad (3)$$

Исходя из уравнения (3) формулу (1) можно записать в виде

$$\tau = \tau_0 \left(\exp\left(\frac{U_{0,0} - \gamma_0\sigma}{RT}\right) + \exp\left(\frac{U_{0,1} - \gamma_1\sigma}{RT}\right) f(\omega_1) + \dots + \exp\left(\frac{U_{0,n} - \gamma_n\sigma}{RT}\right) f(\omega_n) \right), \quad (4)$$

где $f(\omega)$ — функция завершенности стадии;

n — количество стадий термической деструкции.

Значения функций $f(\omega)$ должны изменяться от 0, если стадия не началась, до 1, если стадия закончилась:

$$f(\omega_i) = \frac{\omega_{i,\text{нач}} - \omega_i}{\omega_{i,\text{нач}}}, \quad (5)$$

где ω_i — текущая относительная масса i -й стадии;

$\omega_{i,\text{нач}}$ — начальная относительная масса i -й стадии.

Значения текущих масс стадий могут быть определены исходя из кинетических параметров термической деструкции исследуемого материала и его поля температур [8–10]:

$$\omega_n(T, \tau) = \omega_{0,n} \exp\left[-A_n \int_{\tau_k}^0 \exp\left(-\frac{E_n}{RT}\right) d\tau\right], \quad (6)$$

где $\omega_{0,n}$, A_n , E_n — кинетические параметры отдельных стадий термической деструкции.

Первый член в правой части уравнения (4) описывает долговечность материала до начала термической деструкции, второй член — изменение долговечности при завершении первой стадии, третий член — изменение долговечности при завершении второй стадии и т. д.

Значения структурно-чувствительных коэффициентов γ_i и энергетических констант $U_{0,i}$ для исходного материала и для каждой стадии термической деструкции определяются экспериментально с применением метода неопределенного разложения.

Данный подход позволяет описывать длительную прочность материалов, подвергающихся термической деструкции, независимо от температуры, закона ее изменения и времени нагрева.

Выполнены экспериментальные исследования долговременной прочности на сжатие поперек волокон образцов из древесины сосны. Влажность образцов $W = 10\%$, размеры: $10 \times 10 \times 10$ мм. Эксперименты проводились при постоянной температуре $T = 18 \dots 22$ °С при различных напряжениях.

На рис. 1 приведены типичные кривые изменения высоты образцов при постоянной механической и тепловой нагрузке $\sigma = 5 \cdot 10^6$ н/м² = const и $T = 293$ К = const. Угол наклона годовых колец у всех образцов составляет 45°. Из графиков видно, что разброс величин сжатия достигает 25%. Однако характер изменения высоты во всех экспериментах одинаков. Сначала образцы сжимались до определенного значения, и величина первоначального сжатия у образцов различная. Скорость дальнейшего сжатия у всех образцов одинакова.

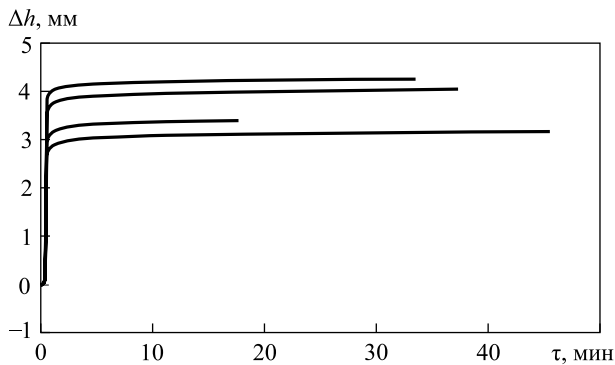


Рис. 1. Изменение высоты образцов при сжатии
Fig. 1. Change in the height of the specimens during compression

Это может быть связано с вариациями плотности образцов.

На рис. 2 приведены результаты исследования длительной прочности при сжатии образцов древесины сосны. Образцы для исследования выпиливали из одной заготовки с углом наклона годовых колец $\alpha \approx 45^\circ$. Вариации значений плотности

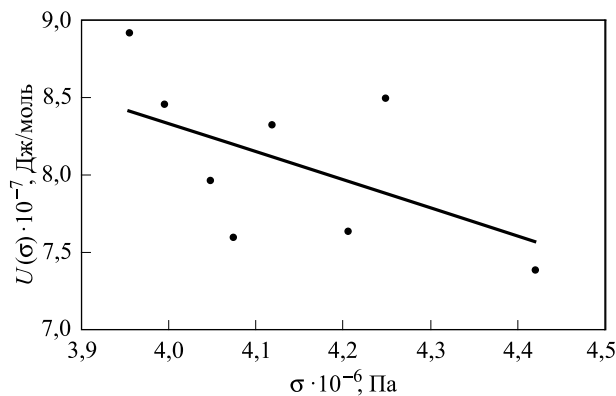


Рис. 2. Зависимость энергии $U(\sigma)$ активации процесса механического разрушения образцов древесины от приведенной нагрузки

Fig. 2. The dependence of the energy $U(\sigma)$ on the activation of the process of mechanical destruction of wood samples from the applied load

составляют до 12 %. Точки — экспериментальные данные, линия — расчетные данные.

Исследования показали, что образцы с меньшей плотностью имеют большее первоначальное сжатие. Для проверки зависимости приведем механическую нагрузку к плотности:

$$k_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\max}}, \quad \bar{\sigma}_i = \frac{\sigma_i}{k_i}.$$

Здесь ρ_i и ρ_{\max} — плотность i -го образца и максимальная плотность образца соответственно; $\bar{\sigma}$ — приведенная нагрузка.

На рис. 3 приведены графики зависимости $U(\sigma)$ от приведенной механической нагрузки. Сравнение графиков на рис. 2 и 3 показывает, что

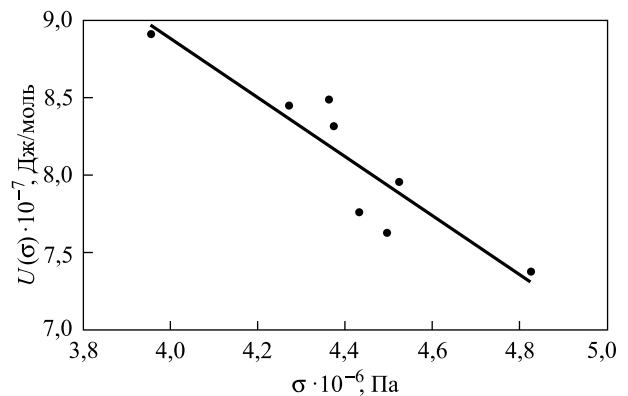


Рис. 3. Силовые зависимости $U(\sigma)$ энергии активации от приведенной нагрузки

Fig. 3. The force dependences $U(\sigma)$ of the activation energy on the reduced load

во втором случае дисперсия результатов значительно меньше. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений $U(\sigma)$ от расчетной зависимости составляет $S = 3,9 \cdot 10^6$. При приведении нагрузки среднеквадратичное отклонение $U(\bar{\sigma})$ от расчета составляет $S = 2,1 \cdot 10^6$. Разброс экспериментальных значений уменьшился в два раза. Это означает, что кинетика механической деструкции зависит от начальной плотности образцов.

Проведены экспериментальные исследования длительной прочности при сжатии образцов, выпиленных из разных заготовок со средней плотностью $\rho = 580 \text{ кг/м}^3$. По результатам экспериментальных исследований при решении системы уравнений (2) методом наименьших квадратов определены средние кинетические параметры механодеструкции. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных, полученные достоверные интервалы указанных параметров:

$$\tau_0 = 10^{-12} \text{ с},$$

$$U_0 = 1,522 \cdot 10^8 \pm 2,33 \cdot 10^7 \text{ Дж/моль},$$

$$\gamma = 12,9 \pm 6,103 \text{ (Дж} \cdot \text{м}^2\text{)/(моль} \cdot \text{Н)}.$$

Для определения изменения параметров длительной прочности при термической деструкции выполнены исследования кинетики разрушения образцов с непределным термическим разложением, проведен нагрев образцов с выходом половины первой стадии. Результаты исследования образцов, прошедших термообработку, приведены на рис. 4.

На рис. 5 приведены результаты механического разрушения при сжатии образцов после отжига первой и половины второй стадии.

Усредненные кинетические параметры механического разрушения образцов даны в табл. 1.

На рис. 6 даны для сравнения графики силовых зависимостей $U(\sigma)$ от приведенной на-

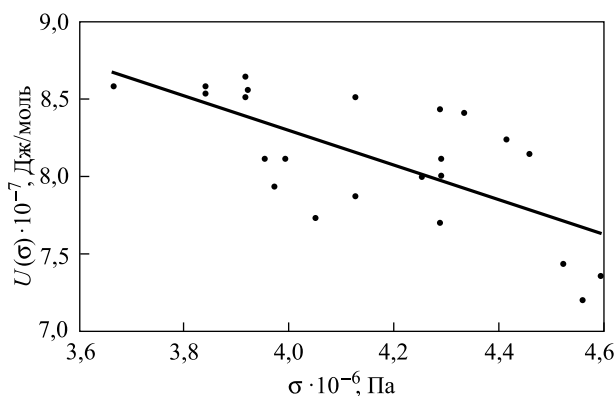


Рис. 4. Силовые зависимости энергии $U(\sigma)$ активации процесса механического разрушения образцов древесины после термообработки и выхода половины первой стадии от приведенной нагрузки

Fig. 4. The force dependences $U(\sigma)$ of the activation energy of the process of mechanical destruction of wood samples after heat treatment and the exit of the half of the first stage from the reduced load

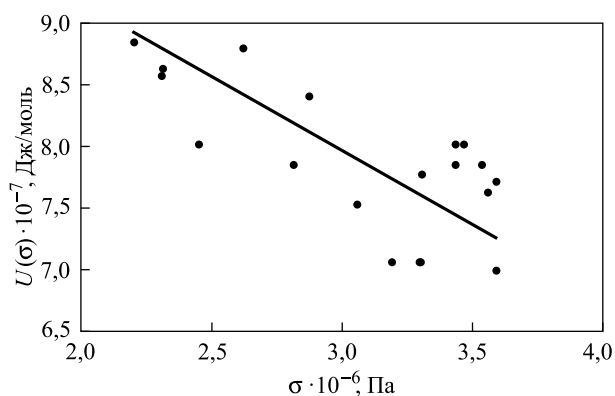


Рис. 5. Силовые зависимости энергии $U(\sigma)$ активации процесса механического разрушения образцов древесины после термообработки и выхода первой и половины второй стадии от приведенной нагрузки

Fig. 5. Force dependences $U(\sigma)$ of activation energy of the process of mechanical destruction of wood samples after heat treatment and the output of the first and half of the second stage from the given load

грузки для немодифицированной и модифицированной при разных режимах древесины. По результатам экспериментальных исследований (см. табл. 1) получена в явном виде формула (4). Для двух стадий термической деструкции уравнение имеет вид

$$\tau = \tau_0 \left(\exp\left(\frac{U_{0,0} - \gamma_0 \sigma}{RT}\right) - \exp\left(\frac{U_{0,1} - \gamma_1 \sigma}{RT}\right) f(\omega_1) - \exp\left(\frac{U_{0,2} - \gamma_2 \sigma}{RT}\right) f(\omega_2) \right). \quad (7)$$

Кинетические параметры определяли следующим образом:

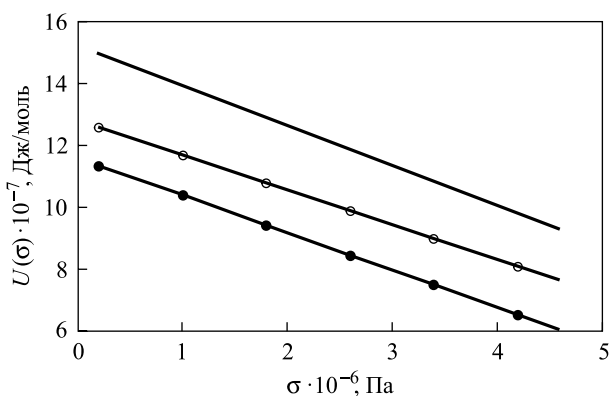


Рис. 6. Силовые зависимости энергии $U(\sigma)$ активации процесса механического разрушения образцов древесины: — не модифицированная древесина; —○— отжиг половины первой стадии; —●— отжиг первой стадии и половины второй

Рис. 6. Force dependences of energy $U(\sigma)$ for the activation of the process of mechanical destruction of wood samples: — unmodified wood; —○— annealing of half of the first stage; —●— annealing of the first stage and half of the second stage

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетов кинетических параметров механической деструкции образцов сосны

Results of calculations of kinetic parameters of mechanical destruction of pine samples

Образец	$\tau_{0, i}$, с	$U_{0, i}$, Дж/моль	γ_i , (Дж·м²)/(моль·Н)
Не модифицированная древесина	10^{-12}	$1,522 \cdot 10^8$	12,9
Отжиг половины первой стадии	10^{-12}	$1,28 \cdot 10^8$	11,22
Отжиг первой и половины второй стадии	10^{-12}	$1,157 \cdot 10^8$	12,02

1) рассчитывали параметры $U_{0,0}$ и γ_0 из экспериментов с немодифицированной древесиной (в этом случае второй и третий члены в уравнении (6) равны 0);

2) отжигали древесину с выходом первой стадии, образцы испытывали на сжатие, по результатам определяли $U_{0,1}$ и γ_1 ;

3) материал отжигали с выходом первой и второй стадий, после испытаний рассчитывали кинетические параметры $U_{0,2}$ и γ_2 .

Получены доверительные интервалы кинетических параметров каждой стадии механодеструкции.

Функция $f(\omega)$ определяется из соотношения (5). Значения кинетических параметров τ , U , γ приведены в табл. 2.

Исследования потери прочности при сжатии образцов, подвергшихся модифицированию с выходом третьей и последующих стадий, не проводилось.

Т а б л и ц а 2
Результаты расчетов кинетических параметров механодеструкции для уравнения (6)
The results of calculating the kinetic parameters of mechanodestruction for equation (6)

Стадия	$\omega_{\text{нач}}$	$t_0, \text{с}$	$U_0, \text{Дж/моль}$	$\gamma, (\text{Дж}\cdot\text{м}^2)/(\text{моль}\cdot\text{Н})$
0	–	10^{-12}	$1,52200\cdot 10^8 \pm 2,33\cdot 10^7$	$12,9 \pm 6,103$
1	0,023	10^{-12}	$1,521996\cdot 10^8 \pm 1,458\cdot 10^7$	$12,901112 \pm 3,649$
2	0,077	10^{-12}	$1,333737\cdot 10^8 \pm 1,086\cdot 10^7$	$12,065262 \pm 3,675$

Выводы

Зная время и интенсивность термического воздействия, можно определить текущие значения относительных масс первой и второй стадий термодеструкции (см. формулу (6)) и время до разрушения при сжатии образцов (см. формулу (7)).

Выполненная проверка адекватности предложенной модели длительной прочности материалов с различной степенью термической деструкции показывает удовлетворительное совпадение результатов экспериментальных и расчетных данных. Для полимерных композиционных материалов погрешность расчета по модели составляет до 15 %, для древесины — до 25 %. Это связано с неоднородностью древесины и наличием локальных особенностей строения.

Список литературы

[1] Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

Сведения об авторах

Ермоченков Михаил Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ermochenkov@mgul.ac.ru

Евстигнеев Алексей Георгиевич — заведующий лабораторией МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), evstigneev@mgul.ac.ru

- [2] Журков С.Н., Санфирова Т.П. Температурно-временная зависимость прочности чистых металлов // Доклады АН СССР, 1955. Т. 101. № 2. 237 с.
- [3] Журков С.Н., Томашевский Э.Е. Исследование прочности твердых тел. Ч. II: Зависимость долговечности от напряжения // Журнал технической физики, 1955. № 25 (1). 66 с.
- [4] Ермоченков М.Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 111–115.
- [5] Slopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis // 3rd Int. Conf. on Applied Energy (ICAЕ), Perugia, Italy, 2011 // Applied Energy, 2012, v. 97, pp. 491–497.
- [6] Srinivas K., Pandey K.K. Effect of Heat Treatment on Color Changes, Dimensional Stability, and Mechanical Properties of Wood // Journal of Wood Chemistry and Technology, 2012, v. 32, iss. 4, pp. 304–316.
- [7] Rautkari L., Honkanen J., Hill C.A.S., Ridley-Ellis D., Hughes M. Mechanical and physical properties of thermally modified Scots pine wood in high pressure reactor under saturated steam at 120, 150 and 180 A degrees C // European J. of Wood and Wood Products, 2014, v. 72, iss. 1, pp. 33–41.
- [8] Wetzig M., Sieverts T., Bergemann H. Mechanical and physical properties of wood, heat-treated with the vacuum press dewatering method // Bauphysik, 2012, v. 34, iss. 1, pp. 1–10.
- [9] Ермоченков М.Г. Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. науч. тр. М.: МГУЛ, 2014. Вып. 370. С. 113–118.
- [10] Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by Echinodontium taxodii using a modified three-parallel-reactions model // Bioresource Technology, 2015, v. 185, pp. 324–330.
- [11] Кладов М.Ю., Ермоченков М.Г. Исследование кинетических параметров механодеструкции композиционных материалов // Научн. тр. МГУЛ. М.: МГУЛ, 2005. Вып. 331. С. 193–202.
- [12] Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЛТИ, 1990. 542 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2017.

CHANGE OF WOOD PROPERTIES IN THERMAL MODIFICATION

M.G. Ermochenkoy, A.G. Evstigneev

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

ermochenkoy@mgul.ac.ru

Thermal treatment of wood is widely used to improve its properties. One such kind of treatment is thermal modification. Thermally modified wood can be used as structural and finishing materials. This implies the availability of information on its strength properties and their dependence on the degree of modification. Thermal treatment leads to the destruction of wood, which is accompanied by a change in its structure and properties, including strength. In the article, the long-term strength of wood samples under compression and its change during thermal modification was investigated. Material during heat treatment destroys, which is a complex multi-stage physico-chemical process. The rate of its flow is determined by the kinetic parameters of thermal destruction, temperature, heating rate and thermal action time. The article presents the results of experimental studies of the long-term strength of wood under compression. The corresponding kinetic parameters are obtained. To determine the dependence of the kinetics of mechanical failure on the degree of thermal destruction, heat treatment of the samples was carried out. The modes of heat exposure were selected in such a way that the thermal decomposition of the wood occurred with the consecutive completion of the individual stages. The determination of the long-term strength of the samples after heat treatment was carried out, the corresponding kinetic parameters were calculated. A mathematical model is proposed for the dependence of the long-term strength of wood samples under compression, taking into account the completeness of the individual stages of thermal destruction. It allows determine the time of destruction of pine wood samples depending on the load, as well as on the intensity and time of thermal modification. The corresponding coefficients in the model are determined.

Keywords: modified wood, wood properties, long-term strength, thermal degradation, kinetic parameters

Suggested citation: Ermochenkoy M.G., Evstigneev A.G. *Izmenenie prochnostnykh svoystv drevesiny pri termicheskom modifitsirovaniy* [Change of wood properties in thermal modification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 94–99. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-1-94-99

References

- [1] Regel' V.R., Slutsker A.I., Tomashevskiy E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [The kinetic nature of the strength of solids]. Moscow: Nauka, 1974, 560 p.
- [2] Zhurkov S.N., Sanfirova T.P. *Temperaturno-vremennaya zavisimost' prochnosti chistyykh metallov* [Temperature-Time Dependence of the Strength of Pure Metals] *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1955, v. 101, no. 2, 237 p.
- [3] Zhurkov S.N., Tomashevskiy E.E. *Issledovanie prochnosti tverdykh tel. II. Zavisimost' dolgovechnosti ot napryazheniya* [Investigation of the strength of solids. II. Dependence of the durability on the voltage]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1955, no. 25 (1), 66 p.
- [4] Ermochenkoy M.G. *Prognozirovaniye svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Forecasting the properties of thermally modified wood]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2010, no. 4 (73), pp. 111–115.
- [5] Slopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. 3rd Int. Conf. on Applied Energy (ICAPE), Perugia, Italy, 2011. *Applied Energy*, 2012, v. 97, pp. 491–497.
- [6] Srinivas K., Pandey K.K. Effect of Heat Treatment on Color Changes, Dimensional Stability, and Mechanical Properties of Wood. *Journal of wood chemistry and technology*, 2012, v. 32, iss. 4, pp. 304–316.
- [7] Rautkari L., Honkanen J., Hill C.A.S., Ridley-Ellis D., Hughes M. Mechanical and physical properties of thermally modified Scots pine wood in high pressure reactor under saturated steam at 120, 150 and 180 A degrees C. *European journal of wood and wood products*, 2014, v. 72, iss. 1, pp. 33–41
- [8] Wetzig M., Sieverts T., Bergemann H. Mechanical and physical properties of wood, heat-treated with the vacuum press dewatering method. *Bauphysik*, 2012, v. 34, iss. 1, pp. 1–10.
- [9] Ermochenkoy M.G. *Kinetika termicheskoy destruktssii drevesiny v srede inertnykh gazov* [Kinetics of thermal destruction of wood in an inert gas environment]. *Technology and equipment for wood processing: scientific works MGUL*. Moscow: MGUL, 2014, v. 370, pp. 113–118.
- [10] Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model. *Bioresource Technology*, 2015, v. 185, pp. 324–330.
- [11] Kladoy M.Yu., Ermochenkoy M.G. *Issledovanie kineticheskikh parametrov mekhanodestruktssii kompozitsionnykh materialov* [Investigation of the kinetic parameters of mechanodestruction of composite materials] *Scientific works MGUL*. Moscow: MGUL, 2005, iss. 331, pp. 193–202.
- [12] Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialakh teplovooy zashchity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh sistem: dis. ... d-ra tekhn. nauk.* [Energy and mass transfer in the materials of thermal protection of reusable rocket and space systems: diss. ... Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow: MLTI, 1990. 542 p.

Authors' information

Ermochenkoy Mikhail Gennad'evich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of BMSTU (Mytishchi branch), ermochenkoy@mgul.ac.ru

Evstigneev Aleksey Georgievich — Head. of Laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), evstigneev@mgul.ac.ru

Received 08.06.2017.