

УДК 630.381.2

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАТИВНОСТИ И
ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ФАНЕРЫ**

В.П. Ярцев, О.А. Киселева, А.В. Сузюмов

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», ГОУ ВПО «ТГТУ»

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: деформативность; долговечность; композиты; предел длительного сопротивления; физические и эмпирические термофлуктуационные константы.

Аннотация: Исследованы закономерности прочностной и деформационной долговечности фанеры в широком диапазоне нагрузок и температур. Получены значения физических и эмпирических констант, определяющих ее долговечность. Изучено влияние различных эксплуатационных факторов на величины констант, что позволяет прогнозировать долговечность фанеры.

Фанера нашла широкое применение в строительных изделиях, ограждающих и несущих конструкциях. Одним из преимуществ данного материала является существенная экономия деловой древесины. В процессе эксплуатации изделия из фанеры могут находиться под действием кратковременных или длительных нагрузок, температур и других внешних факторов (агрессивные жидкие и газообразные среды, УФ-облучение и т.д.), которые приводят их к предельному состоянию (критическому деформированию или разрушению).

Для фанеры резко проявляется температурно-временная зависимость прочности (предела текучести), поэтому для разработки методики прогнозирования ее долговечности необходимо использовать термофлуктуационную концепцию разрушения и деформирования твердых тел [1].

При нагружении древесины различными постоянными нагрузками экспериментально полученная кривая длительного сопротивления имеет асимптотический характер [2]. Для фанеры характер зависимости сохраняется, однако величина предела длительного сопротивления существенно больше чем у древесины. Повышение предела длительного сопротивления у фанеры, по-видимому, связано с многослойной структурой материала и ступенчатым механизмом его разрушения.

Фанеру различной слоистости (на фенолоформальдегидной и карбомидоформальдегидной смолах) испытывали на долговечность (время до разрушения или достижения заданной деформации) при поперечном изгибе и пенетрации в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Экспериментально полученные зависимости логарифма долговечности от напряжения (твердости) (рис. 1) описываются уравнением

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (1)$$

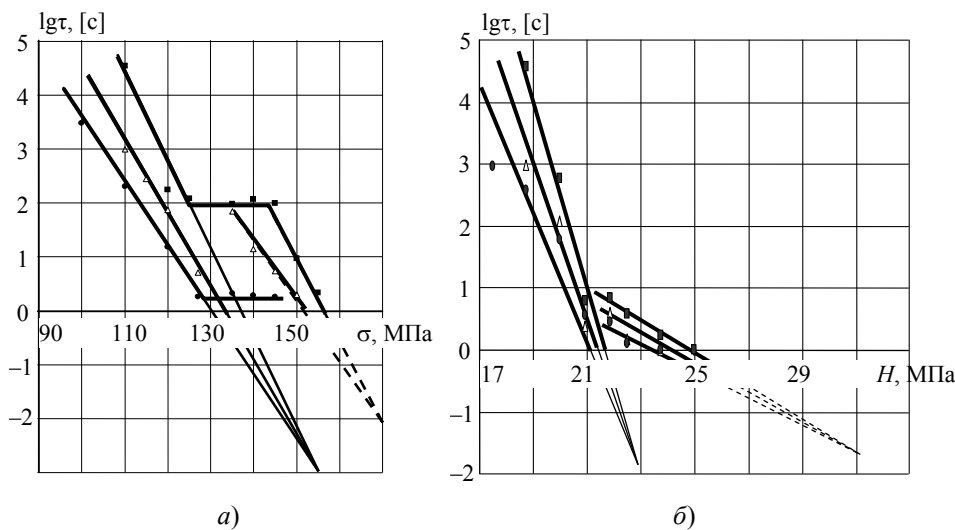


Рис. 1. Зависимость долговечности фанеры марки ФК:
 а – от напряжения при поперечном изгибе: ■ – 20 °С; Δ – 50 °С; ● – 80 °С;
 б – от твердости (при глубине внедрения индентора 1 мм): ■ – 22 °С; Δ – 40 °С; ● – 55 °С

где τ_m , U_0 , γ и T_m – физические константы материала: τ_m – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов), с; U_0 – максимальная энергия активации разрушения, кДж/моль; γ – структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа); T_m – предельная температура существования твердого тела (температура разложения), К; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); τ – время до разрушения (долговечность), с; σ – напряжение (твердость), МПа; T – температура, К.

Слоистое строение композита приводит к сложному механизму разрушения и деформирования. Так, в интервале напряжений (130...160 МПа) наблюдается послойное разрушение, а в интервале напряжений (90...130 МПа) фанера работает как монолитный материал [3]. При пенетрации одновременно протекают два процесса: критическое деформирование (интервал твердости 17,5...20 МПа) и разрушение (интервал твердости 22...25 МПа) [4], что подтверждается микрофотографиями испытанных образцов

Влияние количества слоев на долговечность и механизм разрушения исследовано для фанеры марки ФК (рис. 2). Из рисунка видно, что зависимость долговечности от напряжения при разном количестве слоев имеет характер параллельных прямых, что указывает на постоянство константы γ , определяющей физическую структуру фанеры. Нелинейное падение долговечности композита с увеличением количества слоев, по-видимому, связано с кинетикой деструкции клеевой прослойки и увеличением количества дефектов в шпонах.

Графоаналитическим способом для всех исследованных материалов определены физические константы, значения которых представлены в табл. 1.

Из таблицы видно, что при больших напряжениях разрушение фанеры определяется физическими свойствами смолы (клея), а не древесного шпона. Это отражается на величинах всех констант (см. табл. 1). В интервале напряжений более 130 МПа U_0 близка к величине максимальной энергии активации смолы, а в интервале менее 130 МПа – к энергии активации разрушения целлюлозы. Значения остальных констант подтверждают изменение механизма разрушения фанеры при определенных граничных напряжениях: происходит увеличение τ_m , γ и уменьшение T_m . Для фанеры марки ФСФ характерны большие величины энергии ак-

тивации, что вызвано явлением кратности – одновременно происходит разрушение не одной, а нескольких химических связей [3].

С увеличением количества слоев, величины энергии активации U_0 и структурно-механической константы γ увеличиваются, а температуры полюса T_m падают (табл. 2). Увеличение U_0 , по-видимому, связано с количеством клея определяющего кинетику его термодеструкции [5].

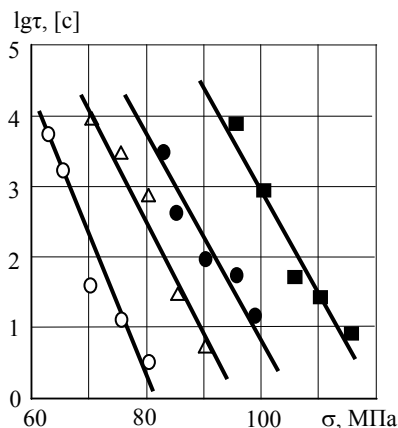


Рис. 2. Зависимость долговечности от напряжения при поперечном изгибе для фанеры марки ФК различной слоистости:
 ■ – 3 слоя; Δ – 5 слоев,
 ● – 7 слоев; ○ – 9 слоев

Увеличение γ связано с ростом вероятности образования дефектов в массе шпона, что и приводит к снижению однородности структуры.

При пенетрации фанеры (см. табл. 1) в области малых нагрузок (< 20 МПа) определяющими являются деформационные процессы. Это проявляется в значениях всех констант: так энергия активации (в 7 раз), структурно-механическая константа (в 10 раз) больше, а температура полюса (в 1,5 раза) меньше аналогичных констант при напряжениях более 20 МПа. Величины констант U_0 , γ и T_m в области больших напряжений (> 20 МПа) близки значениям констант, определяющим процесс разрушения. Это подтверждает ведущую роль процесса разрушения при пенетрации в области напряжений выше 20 МПа [4].

Таблица 1

Физические константы фанеры при разных видах нагрузки

Марка	Вид нагрузки	Температура, °С	Напряжение, МПа	Физические константы			
				τ_m, c	T_m, K	$U_0, кДж/моль$	$\gamma, \frac{e\Delta\alpha}{\dot{\epsilon}\dot{\alpha}\epsilon\dot{u}}$
ФСФ	Поперечный изгиб	< 40	< 80	$10^{-0,88}$	369	633	7
			> 80	10^{-1}	303	3518	45
		> 40	< 80	$10^{-0,4}$	431	486	5,6
			> 80	$10^{-1,1}$	400	790	8
ФК	Поперечный изгиб	–	< 130	$10^{-2,75}$	1010	209	1,4
			> 130	$10^{-1,81}$	435	480	2,86
	Пенетрация	–	< 20	$10^{-2,15}$	445	560	24
			> 20	$10^{-1,6}$	662	78	2,26
ФСФ*	Поперечный изгиб	< 40	–	$10^{-0,63}$	323	1752	45
		> 40	–	$10^{-0,57}$	610	138	3,88
ФСФ**	–	–	–	$10^{-1,45}$	394	455	5,1

* После воздействия ортофосфорной кислоты в течение трех дней.

** После 60 циклов замораживания–оттаивания.

Таблица 2

Значения физических констант при поперечном изгибе

Марка фанеры	Количество слоев	Интервал температур, °С	Физические константы			
			τ_m, c	T_m, K	$U_0, кДж/моль$	$\frac{\gamma, \text{êÀæ}}{\text{ÏÏà} \cdot \text{îëü}}$
ФК	3	20...60	$10^{-0,18}$	444	297,5	2,44
	5	20...60	$10^{-0,29}$	395	371	3,73

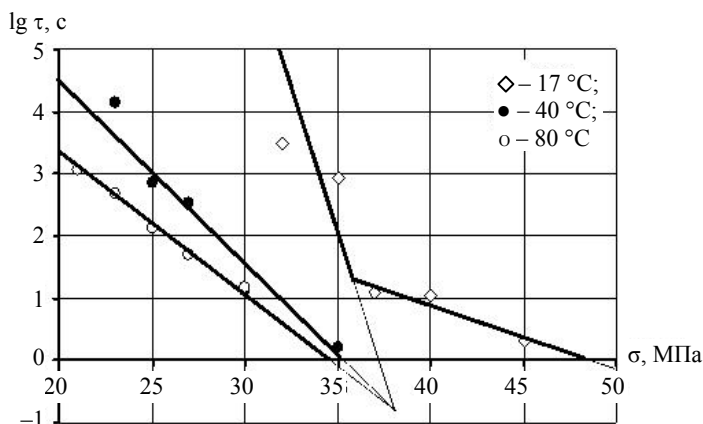


Рис. 3. Зависимость долговечности от напряжения для фанеры марки ФСФ при поперечном изгибе после воздействия ортофосфорной кислоты в течение 3 суток

В процессе эксплуатации фанера часто подвергается дополнительным внешним воздействиям (жидких агрессивных сред, атмосферной влаги, термо- и фото-старению). Исследование влияния жидких агрессивных сред на прочность и долговечность фанеры показало следующее. Фанера стойка к действию органического растворителя и машинного масла и резко снижает прочность в кислотах и щелочи. При взаимодействии со щелочью вначале происходит изменение цвета и размягчение материала, а затем и его коробление. При воздействии кислот происходит расслоение образцов, то есть разрушение клеевых прослоек [6].

Следует отметить, что характер зависимостей долговечности от напряжения и температуры до и после воздействия среды сохраняется (рис. 3), однако наблюдается изменение величин всех физических констант, что и приводит к падению долговечности фанеры [6]. Значения физических констант после воздействия кислоты представлены в табл. 1. Из нее видно, что воздействие ортофосфорной кислоты приводит к падению энергии активации, а также структурно-механической константы в интервале температур более 40 °С. Уменьшение величин констант (отсутствие явления кратности) для фанеры, по-видимому, связано с частичным разрушением связей от воздействия кислоты. При проведении длительных испытаний в натуральных условиях действие атмосферной воды и колебания температуры на долговечность фанеры можно учесть с помощью поправки и тогда уравнение для долговечности примет вид

$$\lg \tau = \lg \tau_m + \frac{U_0 - \gamma \sigma}{2,3RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) - \Delta, \quad (2)$$

где Δ – поправка, учитывающая действие дополнительных внешних факторов.

Величина поправки в интервале напряжений >135 МПа (составила 0,6), а в интервале напряжений <135 МПа (определяется по формуле $\Delta = 1145\sigma - 12,64$) [6].

Исследование влияния циклов замораживания–оттаивания на долговечность и механизм разрушения фанеры показало, что после 60 циклов зависимость логарифма долговечности от напряжения, также описывается уравнением (1). Характер данной зависимости упростился: нет изломов, то есть во всем диапазоне напряжений материал работает как монолитный. Это, по-видимому, связано с нарушением связей между полимером и древесным шпоном, что также подтверждается увеличением коэффициента теплового расширения (в 1,5 раза). Отрицательное действие замораживания–оттаивания на коэффициент теплового расширения проявляется уже на 30 цикл (табл. 3).

После многократного замораживания–оттаивания величины трех констант (τ_m , U_0 и γ) падают. Снижение предэкспоненты τ_m связано с колебанием частиц меньшего размера, то есть произошло разрушение связей и размер кинетических единиц уменьшился. Падение энергии активации U_0 и структурно-механической константы γ объясняется снижением энергетического барьера за счет увеличения расстояния между частицами под действием воды, а также возникновением концентраторов напряжений при ее замерзании. Такое поведение констант приводит к падению прочности и долговечности фанеры.

Существенное влияние на долговечность фанеры оказывают термо- и фото-старение. Тепловое старение (при $+80$ °С) и УФ-облучение образцов проводилось в течение 10...200 ч. После заданного времени воздействия образцы испытывались на прочность (твердость) и долговечность. Результаты испытаний представлены в табл. 4 и 5 [8].

Из табл. 4 видно, что термо- и фотостарение приводит к росту прочности и твердости фанеры. Причем наиболее существенное влияние оказывает теплостарение. Повышение прочности композита под воздействием повышенных темпера-

Таблица 3

Влияние замораживания–оттаивания на коэффициент линейного термического расширения фанеры, $1/^\circ\text{C}$

Материал	Количество циклов замораживания–оттаивания		
	0	30	60
Фанера марки ФСФ	$1,483 \cdot 10^{-6}$	$2,324 \cdot 10^{-6}$	$2,287 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4

Влияние старения на механические характеристики фанеры марки ФК

Вид воздействия	Вид нагрузки	Остаточная прочность (твердость) образцов (%) после теплового старения в течение часов					
		10	20	40	80	120	200
Тепловое старение	Поперечный изгиб	144	124	118	114	112	103
УФ-облучение		117	–	115		113	112
Тепловое старение	Пенетрация	96	171	178	168	164	164
УФ-облучение		–	107	118	–	121	121

**Поправки, учитывающие влияние термо- и фотостарения
на долговечность фанеры марки ФК**

Внешний фактор	Фанера при напряжении, σ	
	более X МПа	менее X МПа
Теплостарение – 40 часов	$0,156\sigma - 24,41$	$0,038\sigma - 5,15$
УФ-облучение – 50 часов	$0,134\sigma - 9,99$	$0,202\sigma - 15,39$

Пр и м е ч а н и е. При УФ-облучении $X = 80$ МПа, а при термостарении $X = 130$ МПа.

тур, по-видимому, связано с доотверждением связующего [8], а при действии УФ-облучения наличием древесного шпона, выполняющего защитную функцию.

В табл. 5 приведены поправки, учитывающие влияние старения на долговечность фанеры.

Полученные результаты позволяют прогнозировать прочность, долговечность и деформативность фанеры в широком диапазоне нагрузок и температур при дополнительных неблагоприятных воздействиях (агрессивной среды, климатических факторов, старения).

Список литературы

1. Ярцев, В.П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В.П. Ярцев. – Воронеж, 1998. – 42 с.
2. Ярцев, В.П. Влияние вида напряженного состояния, температуры и жидких сред на предел длительного сопротивления древесины / В.П. Ярцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 718–721.
3. Киселева, О.А. Прогнозирование долговечности фанеры в ограждающих и несущих строительных конструкциях / О.А. Киселева, А.В. Сузюмов, В.П. Ярцев // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения : материалы десятых академ. чтений РААСН. – Казань, 2006. – С. 222–224.
4. Киселева, О.А. Закономерности длительного деформирования древесных пластиков при одноосном сжатии и пенетрации / О.А. Киселева, В.П. Ярцев, А.В. Сузюмов // Пластические массы. – 2005. – № 4. – С. 43–45.
5. Влияние жидких агрессивных сред на несущую способность древесных композитов / О.А. Киселева [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 6. – С. 84–86.
6. Ратнер, С.Б. Влияние стабилизирующих добавок и термического расширения на сопротивление термопластов механическому разрушению / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев // Доклады Академии наук СССР. – 1974. – № 6, Т. 216. – С. 1335–1338.
7. Киселева, О.А. Влияние климатических воздействий на прочностную и деформационную работоспособность древесных пластиков / О.А. Киселева, В.П. Ярцев, А.В. Сузюмов // Пластические массы. – 2006. – № 2. – С. 35–37.
8. Киселева, О.А. Влияние термо- и фотостарения на срок службы древесных плит и фанеры в конструкциях одноэтажных жилых зданий / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Труды XIII Международного семинара Азиатско-Тихоокеанской академии материалов «Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века». Т. 2. – Новосибирск, 2006. – С. 185–187.

Forecasting of Strength, Deformation Ability and Durability of Construction Veneer

V.P. Yartsev, O.A. Kiseleva, A.V. Suzyumov

Department "Construction of Buildings and Structures", TSTU

Key words and phrases: composites; deformation ability; durability; limit of prolonged resistance; physical and empirical thermo-fluctuation constants.

Abstract: The paper studies the regularities of the strength and deformation durability of veneer in a wide range of loads and temperatures. The values of physical and empirical constants, determining its durability are produced. The influence of various operation factors on the constants values is studied, thus enabling to forecast the durability of veneer.

Prognostizierung der Festigkeit, der Deformation und der Nutzungsdauer des Baufurniers

Zusammenfassung: Es sind die Gesetzmäßigkeiten der Festigkeits- und Deformationshaltbarkeit des Furniers im breiten Umfang der Belastungen und der Temperaturen untersucht. Es sind die Bedeutungen der physischen und empirischen Konstanten, die ihre Haltbarkeit bestimmen, erhalten. Es ist den Einfluss verschiedener Betriebsfaktoren auf die Größen der Konstanten studiert, was die Haltbarkeit des Furniers vorherzusagen zulässt.

Prévision de la rigidité, de la déformabilité et de la durabilité de la feuille du placage

Résumé: Sont étudiées les régularités de la durabilité de rigidité et de déformabilité de la feuille du placage dans une large gamme des charges et des températures. Sont obtenues les valeurs des constantes physiques et empiriques définissant sa durabilité. Est étudiée l'influence de différents facteurs d'exploitation sur les grandeurs des constantes ce qui permet de prévoir la durabilité de la feuille du placage.
