

УДК 69.07

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ЦЕЛЬНЫХ И СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК БЕЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ С ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННОЙ ПОЗИЦИИ

А.В. Ерофеев, С.П. Скворцов, П.А. Мухортов

Рассмотрена работа двух видов деревянных балок при поперечном изгибе, для которых определены термофлуктуационные константы, по изменению которых сделан вывод о механизме разрушения.

Ключевые слова: деревянные балки; изменение термофлуктуационных констант; обратный пучок; работоспособность цельных и составных балок.

THE MECHANISM OF DESTRUCTION OF SOLID AND COMPOSITE WOODEN BEAMS WITH NO SPECIAL TIES TO THERMALFLUCTUATION POSITION

A. V. Erofeev, S. P. Skvortsov, P. A. Mukhortov

The paper considers the work of two types of wooden beams under transverse bending, for which there is thermalfluctuation constants, which change the conclusion about the mechanism of destruction.

Keywords: wooden beams; changing of the thermalfluctuation constants; inverse beam; performance of solid and composite beams.

Процессы разрушения и деформирования подчиняются принципу температурно-временной силовой эквивалентности и имеют термофлуктуационную природу, т.е. тепловое движение атомов является решающим фактором процессов разрушения и деформирования [1]. Механическое поле только лишь ускоряет данный процесс. Основную работу по разрушению связей выполняют тепловые движения. Следовательно, процессы механического разрушения и деформирования при любых температурах являются механотермическими процессами, происходящими во времени и реализуемыми через элементарные акты разрыва межатомных или иных связей. Время само по себе роли не играет, оно лишь увеличивает количество тепло-

вых флуктуаций, необходимых для реализации тех процессов разрыва связей, которые препятствуют критическому событию [1]. Таким образом, рассматриваемые процессы являются вероятностными.

Для проведения сравнительного анализа процессов разрушения деревянных балок цельного и составного сечений без специальных связей с термофлуктуационной позиции необходимо для каждого вида балок определить термофлуктуационные константы, входящие в обобщенное уравнение Журкова [2]. Таким образом, объектом исследования выступают деревянные балки цельного (рисунок 1, а) и составного сечений без специальных связей (рисунок 2, б). Исследования

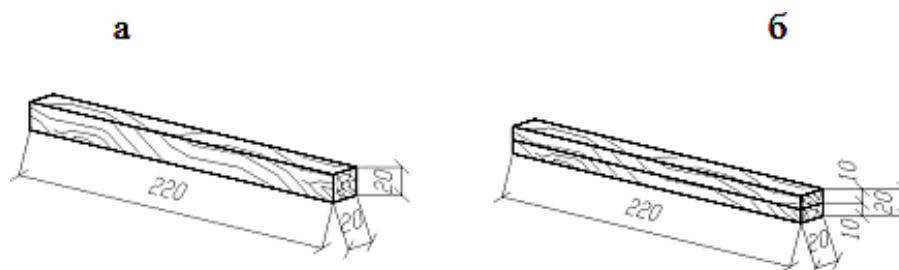


Рисунок 1 – Общий вид образцов для проведения испытаний:
а – цельного сечения; б – составного сечения без специальных связей

Таблица 1 – Значения разрушающих напряжений в зависимости от температуры и вида сечения

Образцы цельного сечения		Образцы составного сечения без специальных связей	
T, °C	σ, МПа	T, °C	σ, МПа
5	69,39	7	77,39
25	57,65	20	74,39
35	53,29	35	52,48

Таблица 2 – Результаты испытаний деревянных образцов на долговечность в зависимости от температуры и напряжений

Образцы цельного сечения						Образцы составного сечения без специальных связей					
T = 5 °C		T = 25 °C		T = 35 °C		T = 7 °C		T = 20 °C		T = 35 °C	
σ, МПа	lgt, [c]	σ, МПа	lgt, [c]	σ, МПа	lgt, [c]	σ, МПа	lgt, [c]	σ, МПа	lgt, [c]	σ, МПа	lgt, [c]
68,00	0,43	56,50	0,81	52,22	0,87	75,84	1,53	72,90	0,49	51,45	0,95
65,92	0,88	54,77	1,31	50,63	2,04	73,53	2,54	70,68	0,65	49,87	1,10
64,53	1,66	56,61	1,45	49,56	2,18	71,98	2,88	69,18	0,90	48,82	1,50
62,45	1,98	51,88	2,85	47,96	2,56	69,66	2,92	66,96	1,68	47,25	2,40
61,06	2,50	50,73	2,93	45,90	4,05	68,11	3,40	65,47	2,4	46,20	3,32

проводили на образцах сечением 20×20 мм и длиной 220 мм при расчетном пролете 200 мм.

Разрушающее напряжение определяли при поперечном изгибе. Нагрузка передавалась в центр образца через рычаг с постоянным передаточным отношением. Разрушающее напряжение при поперечном изгибе находили по формуле:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W},$$

где $M_{\max} = \frac{Pl}{4}$ – максимальный изгибающий момент балки от действующей силы; W – момент сопротивления сечения.

Для деревянной балки цельного сечения момент сопротивления определяли по формуле:

$$W = \frac{I}{y},$$

где $I = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции; y – расстояние от центра тяжести до наиболее удаленной точки сечения.

Для деревянных балок составного сечения без специальных связей геометрические характеристики определяли исходя из допущения о том, что каждая из составных частей балки не влияет на работу другой, т. е. они работают независимо друг от друга [3]. Тогда момент инерции каждой части составной балки будет определяться

по формуле $I = \frac{b\left(\frac{h}{2}\right)^3}{12} = \frac{bh^3}{96}$, а балки в целом:

$$I = \frac{bh^3}{96} + \frac{bh^3}{96} = \frac{bh^3}{48}. \text{ Таким образом, он в четыре}$$

раза будет меньше, чем для балки цельного сечения при прочих одинаковых условиях. Следовательно, момент сопротивления каждой части состав-

ной балки будет равен $W = \frac{\left(\frac{bh^3}{96}\right)}{y} = \frac{4bh^3}{96h} = \frac{bh^2}{24}$,

где $y = \frac{h}{4}$. Тогда момент сопротивления балки

в целом составит $W = \frac{bh^2}{24} + \frac{bh^2}{24} = \frac{bh^2}{12}$. Таким об-

разом, он будет в два раза меньше, чем для балки цельного сечения при прочих одинаковых условиях. Следовательно, несущая способность деревянной балки цельного сечения будет в два раза выше, чем деревянной балки составного сечения без специальных связей при прочих равных условиях, так как величина предельного напряжения при поперечном изгибе деревянных балок является постоянной величиной.

Экспериментальные исследования показали корректность принятого допущения: максимальная разрушающая нагрузка деревянной балки цельного сечения при прочих равных условиях получилась в два раза выше (с учетом допустимой величины погрешности), чем аналогичная величина деревянной балки без специальных связей. Корректность принятого допущения позволяет ее использовать при изучении зависимости долговечности деревянной конструкции от напряжений, действующих в ней.

Начальным этапом определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова является определение величин разрушающих напряжений в зависимости от температуры проведения испытания. Полученные в ходе проведения

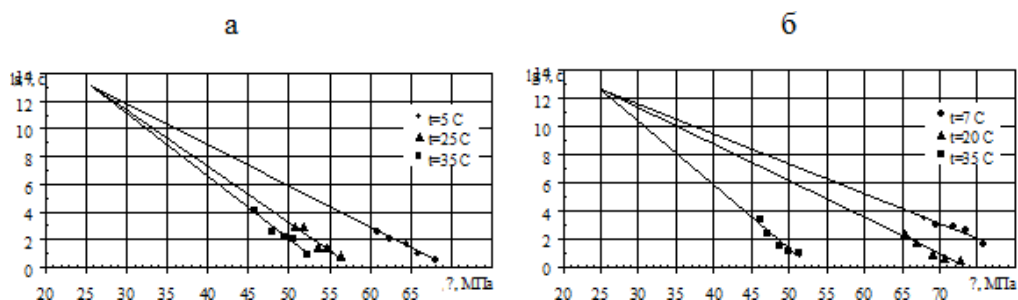


Рисунок 2 – Зависимость времени до разрушения от напряжения

при поперечном изгибе деревянной балки: а – цельного сечения; б – составного сечения без специальных связей

испытаний значения разрушающих напряжений, которые определялись как среднеарифметическое значение не менее 6 образцов, в зависимости от температуры и вида сечения представлены в таблице 1.

Для построения графика в координатах $lg\tau - \sigma$ к образцам (рисунок 1) прикладывали через рычаг с постоянным передаточным отношением нагрузку, создающую в них напряжение при поперечном изгибе в диапазоне от 0,88 до 0,98 от разрушающего напряжения, и фиксировали время до разрушения. Испытания проводили при трех различных температурах, для каждой из которых определяли по 5 точек (фиксировали время до разрушения при пяти различных напряжениях). Для получения каждой точки проводили испытания не менее 6 образцов. Полученные результаты сведены в таблицу 2.

По полученным экспериментальным данным для обоих видов сечения (цельное и составное без специальных связей) построены графики в координатах $lg\tau - \sigma$ (рисунок 2), на которых видно, что при исследуемых температурах зависимость долговечности ($lg\tau$) от напряжения (σ) подчиняется линейной зависимости, при этом температурные прямые сходятся в так называемый “обратный пучок”, т.е. наблюдается схождение в полюс не при предельно высокой, а при предельно низкой температуре. Аналогичные зависимости для древесины были получены и другими исследователями [4]. Полученные зависимости описываются обобщенным уравнением Журкова, которое для случая “обратный пучок” имеет вид:

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

где τ_m^* , U_0^* , γ^* , T_m^* – эмпирические константы.

Для деревянных образцов цельного сечения прямолинейная зависимость $lg\tau = f(\sigma)$ (рисунок 2, а) при температуре 5 °С описывается следующим уравнением: $lg\tau = -0,2992\sigma + 20,758$; при

$T = 25$ °С: $lg\tau = -0,4044\sigma + 23,505$; при $T = 35$ °С: $lg\tau = -0,4573\sigma + 24,864$.

Для деревянных образцов составного сечения без специальных связей прямолинейная зависимость $lg\tau = f(\sigma)$ (рисунок 2, б) при температуре 7 °С описывается следующим уравнением: $lg\tau = -0,2136\sigma + 17998$; при $T = 20$ °С: $lg\tau = -0,2586\sigma + 19,08$; при $T = 35$ °С: $lg\tau = -0,4548\sigma + 24,013$.

Стоит отметить, что в обоих случаях (цельное сечение и составное сечение без специальных связей) температурные прямые сходятся в пучок при $lg\tau = 12,5$ и $\sigma = 25 \div 26$ МПа (рисунок 2).

Для выполнения классического перестроения семейства веерообразных прямых в координаты $lg\tau - 1000/T$ задаются тремя произвольными напряжениями, которые в перестраиваемых координатах обратятся в прямые напряжений. Выбор напряжений осуществляется с тем условием, чтобы на графике в координатах $lg\tau - \sigma$ можно было определить, в том числе и графически, величину $lg\tau$, соответствующую σ для каждой из трех температур. Для деревянных образцов цельного и составного сечений без специальных связей были выбраны напряжения 40, 45 и 50 МПа, которые на графике в координатах $lg\tau = f(1000/T)$ обратились в семейство прямых напряжений сходящихся в полюсе (рисунок 3).

Для деревянных образцов цельного сечения прямолинейная зависимость $lg\tau = f(1000/T)$ (рисунок 3, а) для напряжений 40 МПа, т.е. прямая напряжения 40 МПа, описывается следующим уравнением: $lg\tau = 6,2966(1000/T) - 13,866$. Прямая напряжения 45 МПа описывается уравнением: $lg\tau = 8,5431(1000/T) - 23,446$; а прямая 50 МПа – $lg\tau = 10,792(1000/T) - 33,035$.

Для деревянных образцов составного сечения без специальных связей прямолинейная зависимость $lg\tau = f(1000/T)$ (рисунок 3, б) для напряжений 40 МПа, т.е. прямая напряжения 40 МПа, описывается следующим уравнением: $lg\tau = 11,353(1000/T) - 30,710$. Прямая напряжения 45 МПа описывается уравнением

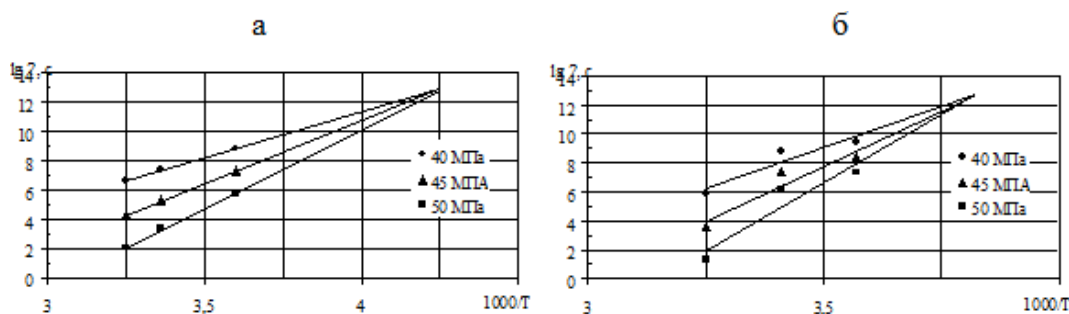


Рисунок 3 – Зависимость времени до разрушения от обратной температуры при поперечном изгибе деревянной балки: а – цельного сечения; б – составного сечения без специальных связей

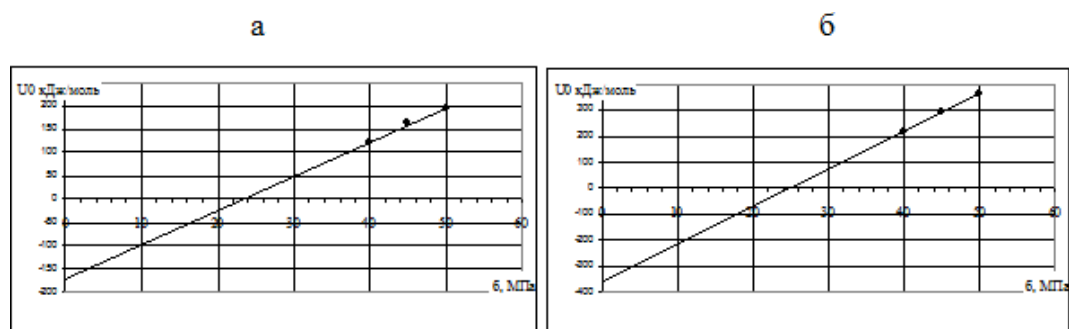


Рисунок 4 – Зависимость термофлуктуационной константы U_0^* от напряжений при поперечном изгибе для деревянной балки: а – цельного сечения; б – составного сечения без специальных связей

$lg\tau = 15,122(1000/T) - 45,107$; а прямая 50 МПа – $lg\tau = 18,891(1000/T) - 59,503$.

Как видно на графиках (рисунок 3) семейство веерообразных прямых сходится в полюс. Координаты полюса определяют две константы обобщенного уравнения Журкова (τ_m^* , T_m^*). Константа $lg\tau_m^*$ для обоих видов сечения получилась одинаковой ($lg\tau_m^* = 12,5$), что говорит о том, что данная константа не зависит от вида сечения. Для деревянных образцов цельного сечения константа $T_m^* = 235$, а для образцов составного сечения без специальных связей – $T_m^* = 262$. Разница между полученными величинами не превышает 11 %, а с учетом того, что методика определения термофлуктуационных констант (в том числе и графоаналитический способ) сопряжена с появлением ряда объективных погрешностей и их накоплением, то константу T_m^* можно считать постоянной величиной, не зависящей от вида сечения.

При сравнительном анализе уравнений прямых напряжений, четко прослеживается, что угловой коэффициент прямой для образцов составного сечения без специальных связей в два раза выше, чем соответствующий коэффициент прямой такого же напряжения для образцов цельного сечения. По данной закономерности уже можно судить о соот-

ношениях оставшихся двух термофлуктуационных коэффициентах рассматриваемых сечений.

Константы U_0^* и γ^* определяются из графика в координатах $U_0^* - \sigma$. Константа U_0^* определяется точкой пересечения прямой с осью ординат, а γ^* по сути, является угловым коэффициентом этой прямой взятым с обратным знаком. Прямая строится по трем точкам с координатами $(\sigma_i; U_i)$. При этом σ_i соответствует принятым ранее напряжениям, а U_i определяется по формуле:

$$U_i = 2,3R \left[\Delta lg\tau / \Delta \left(\frac{1000}{T} \right) \right].$$

Для деревянных образцов цельного сечения прямолинейная зависимость $U_0^* = f(\sigma)$ (рисунок 4, а) описывается следующим уравнением: $U_0^* = 7,363\sigma - 172,14$, а для образцов составного сечения без специальных связей (рисунок 4, б) – $U_0^* = 14,4\sigma - 359$.

Полученные из графиков (рисунок 4) константы с определенными ранее, сведены в таблицу 3, из которой видно, что константы U_0^* и γ^* для деревянных балок составного сечения без специальных связей по модулю в два раза больше чем для аналогичных деревянных балок цельного сечения при прочих равных условиях. По-видимому, это связано с различным характером разрушения рассматриваемых балок [5, 6].

Таблица 3 – Значения констант деревянных балок изготовленных из сосны второго сорта в зависимости от вида сечения

Вид сечения	Эмпирические константы			
	$\lg \tau_m^*$, с	T_m^* , К	U_0^* , кДж/моль	γ^* , кДж/(МПа·моль)
Цельное	12,5	235	-172,14	-7,363
Составное без специальных связей	12,5	262	-359	-14,4

Структура обобщенного уравнения Журкова и полученные зависимости изменения коэффициентов U_0^* и γ^* позволяют вынести общий множитель (для составной балки, состоящей из двух одинаковых частей, он равен 2). Тогда для балки составного сечения без специальных связей обобщенное уравнение Журкова примет вид:

$$\tau = \tau_m^* \exp k_A \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left(\frac{T_m^*}{T} - 1 \right),$$

где τ_m^* , U_0^* , γ^* , T_m^* – эмпирические константы для деревянных балок цельного сечения; k_c – коэффициент перехода к балкам составного сечения. Стоит отметить, что для балки, состоящей из двух одинаковых составных частей, $k_c = 2$, а для балок, состоящих из трех и более составных частей, он требует уточнения.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что несущая способность деревянной балки составного сечения без специальных связей в два раза ниже несущей способности аналогичной деревянной балки цельного сечения при прочих равных условиях, при этом снижение ее долговечности происходит в два раза интенсивнее. Таким образом, при прогнозировании долговечности деревянных балок составного сечения без специальных связей можно использовать полученные коэффициенты обобщенного уравнения Журкова для цельного сечения с введением в формулу коэффициента (k_c), учитывающего количество составных частей балки.

Литература

1. Ратнер С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев // *Металлоорганическая химия*. 1992. С. 320.
2. Ерофеев А.В. Об актуальности разработки методики прогнозирования долговечности деревянных соединений / А.В. Ерофеев, С.П. Скворцов, П.А. Мухоротов // *Научный альманах*. 2017. № 1–3(27). С. 66–68.
3. Умнова О.В. Несущая и деформационная способность стеклопластиковых нагельных соединений в деревянных конструкциях с учетом времени и температуры эксплуатации: автореф. дис... канд. техн. наук / О.В. Умнова. Воронеж: Воронеж. госуд. архитектурно-строительный ун-т, 2005.
4. Ярцев В.П. Прогнозирование прочностной и деформационной работоспособности древесины и древесных композитов / В.П. Ярцев, О.А. Киселева, М.А. Сашин // *Вестник Тамбовского госуд. технич. ун-та*. 2006. Т. 12. № 1. С. 145–153.
5. Линькова М.В. Технический анализ: понятие, сущность и аксиомы / М.В. Линькова // *Территория науки*. 2016. № 3. С. 179–182.
6. Смирнов С.Б. Волновое импульсное воздействие на здания и сооружения / С.Б. Смирнов, А.М. Зулпуев, Б.С. Ордобаев, Ш.С. Абдыкеева // *Территория науки*. 2015. № 3. С. 56–63.