

делирование процесса лущения шпона, анализ структурных и функциональных схем: Отчет о НИР / ЛТА; Руководитель Ю. К. Яхонтов.— Л., 1984. [3]. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций.— М.: Наука, 1968.

Поступила 26 октября 1987 г.

УДК 630*812.7

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю. М. ИВАНОВ, Ю. Ю. СЛАВИК, А. К. ЦВЕТКОВ

ЦНИИСК

Отмечаемое за последнее время расслаивание ряда клееных конструкций зданий происходит как в прямолинейных элементах — балках, рамах, — так и в арках по истечении различных сроков после их изготовления и обычно не совпадает с наиболее напряженными участками в момент действия на конструкцию наибольшей нагрузки. Поверхность расслоения зачастую носит следы фенольной смолы. В слоях элементов (между клеевыми прослойками) наблюдаются также трещины в древесине, которые не нарушают монолитности элементов с целыми клеевыми швами. Как показывает анализ проведенных натуральных обследований, расслаивание конструкций не связано с действием на них нагрузки. Поэтому к обуславливающим его основным факторам относятся, по-видимому, циклические изменения влажностных деформаций и соответствующие напряжения, перпендикулярные плоскости склеивания, которым подвергаются такие конструкции в условиях их монтажа и эксплуатации.

В связи с этим возникает вопрос: где раньше появляется зачаточная трещина, инициирующая расслаивание — в клеевой прослойке или в древесине, учитывая, что появление трещины разгружает соседние (в направлении поперечного растяжения) участки клееного элемента и одновременно сопровождается возникновением в ее вершине концентратора напряжений. Исследование причин указанного явления целесообразно осуществить, по-видимому, в два этапа: 1) рассмотреть обстоятельства, обуславливающие появление трещины при циклических изменениях влажностных деформаций; 2) выяснить условия, способствующие распространению появившейся первичной трещины и расслаиванию клееной конструкции.

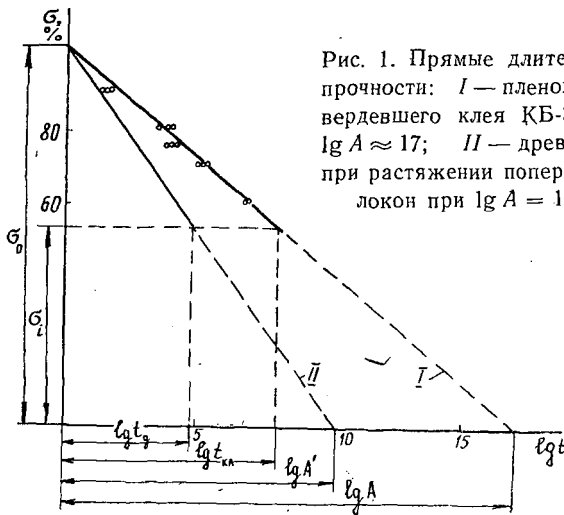
В данной статье исследуем первый этап.

Из-за значительной пористости древесины и весьма развитой поверхности контакта ее с жидким клеем разрушение клевого соединения древесины (в отличие от плотных материалов) не имеет чисто адгезионного характера. Неориентированное (изотропное) вещество клеевой прослойки одинаково сопротивляется напряжениям в разных направлениях, тогда как древесина анизотропна, и ее сопротивление растяжению поперек волокон составляет лишь малую долю сопротивления вдоль волокон со значительно более коротким временем до разрушения [3]. Имея это в виду, сравним длительную прочность древесины при растяжении поперек волокон [3] с длительной когезионной прочностью клеевой прослойки сначала при постоянных температуре и влажности. У полимеров, в том числе неориентированных (как резит-отвердевший фенольный клей), при различных видах напряженного состояния не меняются кинетические параметры U_0 и τ_0 в выражении величины отрезка $\lg A$, отсекаемого прямой $\lg t(\sigma)$ длительной прочности на оси $\lg t$:

$$\lg A = \frac{U_0}{2,3RT} + \lg \tau_0, \quad (1)$$

где U_0 — энергия активации процесса разрушения, кДж/моль;
 τ_0 — период тепловых колебаний атомов, с;
 R — газовая постоянная, кДж/(моль · град);
 T — температура, К.

Величину $\lg A$, характеризующую длительную прочность клеевой прослойки, можно определить применительно к различным видам напряжений, действию которых она подвергается в швах элементов конструкций, из испытаний на длительное растяжение. Испытания пленок отвердевшего клея КБ-3, проведенные в ЦНИИСКе, показали более высокую длительную прочность клеевой прослойки сравнительно с древесиной при растяжении поперек волокон [4]. Для отвердевшего клея величина отрезка $\lg A \approx 17$, т. е. то же, что при растяжении древесины вдоль волокон (рис. 1), тогда как при поперечном растяжении $\lg A \approx 10$ [4]. Отсюда значительная разница во времени до разрушения под действием растягивающих напряжений поперек волокон древесины t_d и отвердевшей клеевой прослойки $t_{кл}$ (рис. 1), т. е. неравенство $t_d < t_{кл}$ указывает на более раннее появление зародыша трещины в древесине. Рассмотрим, как влияют на это соотношение переменные температурно-влажностные воздействия разной интенсивности и повторности, которым подвергаются клееные конструкции в реальных условиях монтажа и эксплуатации.



Для исследования этого вопроса были проведены лабораторные эксперименты, позволившие варьировать как амплитуду и частоту изменений влажностного состояния древесины, так и уровень начальных напряжений. Методика этих опытов описана в работе [7]. Переменным влажностным воздействиям подвергали образцы древесины сосны, вырезанные поперек волокон из боковых частей (на глубину 10 мм) клееного пакета (клей КБ-3). Степень стеснения влажностных деформаций древесины в наружных зонах клееного пакета была оценена моделированием [7] и воспроизведена закреплением образца одним концом к упругой стальной пластинке разной толщины шириной 15 мм, пролетом $l = 90$ мм, а другим — к жесткой рамке, на которой находились опоры пластинки. Измерение прогиба последней относительно рамки давало значение деформации образца (равной его влажностной деформации за вычетом деформаций от силовой реакции пластинки при данном прогибе) после влажностных воздействий в каждом цикле испытаний.

Было испытано на точку по 10 образцов длиной между зажимами $L = 120$ мм при рабочей части сечением 10×10 мм с переходными выкружками к более широким концам. Применяли два режима влажностной обработки: I — продувка воздухом для

увлажнения до $\omega = 24\%$ в течение 8 ч при 20°C с $\varphi = 96\%$ и для сушки до $\omega = 8\%$ в течение 48 ч при той же температуре с $\varphi = 45\%$; II — погружение в воду ($\omega = 30\%$) при 20°C на 30 мин, сушка до $\omega = 5\%$ при 50°C продувкой воздуха с $\varphi = 20\%$ в течение 60 мин. Испытания с приложением циклических влажностных воздействий продолжали до разрушения образцов, которое происходило, как правило, по древесине.

Принятые жесткие условия, соответствующие ускоренным испытаниям, имели целью сделать более заметными их эффект при ограниченном числе циклов. Действительно, на типичных диаграммах испытаний (рис. 2) как при толщине пластинки $h = 0,5$, так и $h = 1,0$ мм обнаруживается отчетливое смещение оси симметрии синусоидальной диаграммы в сторону растягивающего напряжения (т. е. вниз на рис. 2),

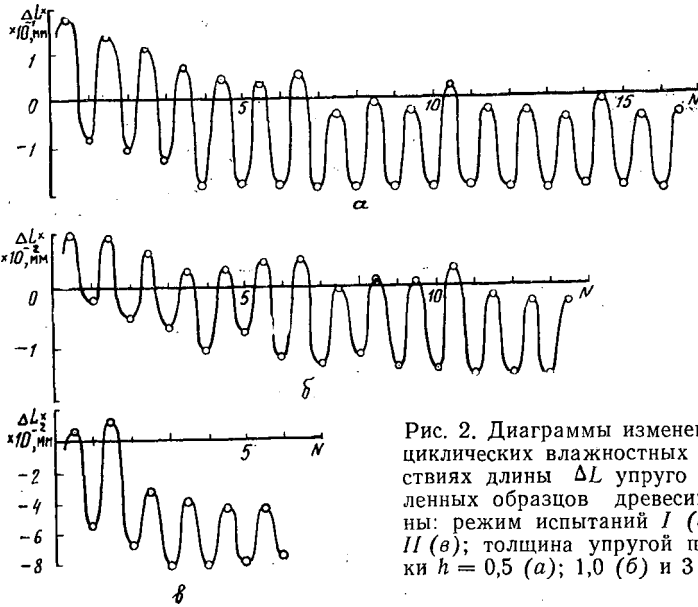


Рис. 2. Диаграммы изменений при циклических влажностных воздействиях длины ΔL упруго закрепленных образцов древесины сосны: режим испытаний I (а, б) и II (в); толщина упругой пластинки $h = 0,5$ (а); $1,0$ (б) и 3 мм (в)

температуры с циклами постепенно уменьшается. Ещё заметнее это явление при II режиме (рис. 2, в). Если бы здесь имели место усталостные явления, то они вызвали бы (вследствие затухания влажностных деформаций) некоторое уменьшение амплитуды напряжений (поскольку в отличие от обычных испытаний на усталость здесь напряжения не контролируются, а задаются влажностными деформациями и соответствующим им модулем), но никак не смещение оси симметрии диаграммы.

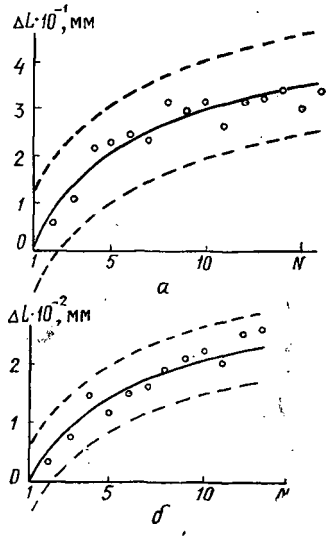
Рассмотрим подробнее влажностные деформации испытываемых образцов. Напряжения в данных опытах определяются прогибом упругой пластинки, а он обусловлен влажностной деформацией образца (за вычетом его силовой деформации от вызванного прогибом пластинки напряжения). Если от цикла к циклу возникает какое-либо изменение длины образца ΔL , равное изменению влажностной деформации, то разность абсолютных прогибов f при увлажнении и высушивании в этих циклах

$$|f_i^- - f_i^+| + |f_i^+ - f_i^-| = |\Delta f_i^-| + |\Delta f_i^+| = \Delta L \quad (2)$$

покажет это изменение, причем в него не войдет влияние силовых деформаций: последние сокращаются при определении разностей прогибов (если пренебречь изменениями напряжений от цикла к циклу).

Отчетливо обнаруживаемое укорочение образцов (рис. 3), т. е. увеличение их усадки, соответствует на диаграммах (рис. 2) уменьше-

Рис. 3. Зависимости укорочения ΔL образца от N при режиме испытания I для толщин упругой пластинки $h = 0,5$ (а) и $1,0$ мм (б); пунктиром показаны доверительные интервалы ΔL



рию приращения деформации разбухания и возрастанию приращения деформации усушки. Более быстрый рост ΔL приходится на начальные циклы влажностных воздействий с постепенным уменьшением их эффекта при тенденции к затуханию. Накапливаясь от цикла к циклу, ΔL достигает достоверного значения уже после нескольких циклов испытаний при I режиме (см. табл.).

Доверительный интервал отклонений Δ от средней кривой $y = 3,216 \lg N$ при $h = 1$ мм (режим I)

№ п/п.	ΔL $0,645 \cdot 10^{-2}$, мм	y	$+\Delta$	$-\Delta$	Δ^2	Доверительный интервал
1	0	0	0	0	0	$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1,081}{11}} =$ $= \pm 0,314;$ $\Delta L = 3,216 \lg N \pm 0,942$ или в масштабе рис. 3, б: $\Delta L = (3,216 \lg N \pm$ $\pm 0,942) 1,55 \cdot 10^{-2}$ мм
2	0,60	0,937	0,367	—	0,134	
3	1,25	1,534	0,284	—	0,081	
4	2,30	1,935	—	0,365	0,133	
5	1,80	2,244	0,444	—	0,197	
6	2,35	2,500	0,150	—	0,022	
7	2,50	2,715	0,215	—	0,046	
8	3,00	2,900	—	0,100	0,010	
9	3,25	3,060	—	0,190	0,036	
10	3,40	3,216	—	0,184	0,034	
11	3,15	3,340	0,190	—	0,036	
12	3,90	3,480	—	0,420	0,176	
13	4,00	3,580	—	0,420	0,176	
			1,650	1,679	1,081	

Итак, циклические колебания влажностных деформаций в стесненных условиях при действии внутренних напряжений вызывают накопление усадочных явлений в древесине с последующим ее разрушением вследствие постепенного ослабления материала. Циклическое увлажнение и высушивание древесины в свободном состоянии, как известно, не вызывают усадки, т. е. число разрываемых увлажнением физических связей соответствует числу блокирующихся при высушивании. При стесненном же набухании, как показали проведенные в жестких условиях эксперименты, указанное равновесие нарушается: в каждом цикле часть связей, заблокированных высушиванием, остается неразорванной при увлажнении, что ведет к постепенному накоплению избыточных (против свободного состояния) связей с сопровождающим его ростом усадки.

На это указывает и падение с числом циклов давления набухания [1], определяемого числом разрывающихся при увлажнении связей. Из последних некоторая доля остается неразорванной от цикла к циклу, т. е. скорость роста числа заблокированных связей $dy/dN = 1/N$, откуда

$$y = a \lg N, \quad (3)$$

где N — число циклов;
 a — постоянная.

Усадку ΔL в первом приближении можно принять линейно связанной с концентрацией избыточных физических связей; на рис. 3 сплошной линией показаны прямые по уравнению (3), кружками — экспериментальные точки $y \approx \Delta L$.

Следовательно, явление усадки древесины при описанных циклических воздействиях есть внешнее проявление процесса увеличения концентрации избыточных физических связей. Каков может быть механизм происходящего при этом ослабления материала? Обратимся к имеющимся данным для других полимеров. В работе [6] проводили сшивание полиметилметакрилата. Установлено, что с увеличением густоты сетки связей сшивания полимера возрастает уровень локальных перенапряжений связей, ответственных за прочность, которая снижается. Следовательно, сшивание ухудшает молекулярную подвижность полимера, повышает неравномерность напряжений его связей, ответственных за прочность, что и приводит к сокращению времени до разрушения. Описанный эффект ухудшения подвижности полимера на его прочность наблюдался и в древесине при сшивании ее лигноуглеводной матрицы [5]; результатом было уменьшение подвижности основного высокоориентированного компонента древесины — природной целлюлозы — и снижение прочности сшитой древесины на растяжение [2]. Этими данными подтверждается предположение [1] о встречном процессе ослабления материала в условиях стесненных циклических влажностных деформаций и увеличения усадки древесины.

Таким образом, более короткое, чем у клеевой прослойки, время до разрушения древесины при действии в ней внутренних растягивающих напряжений поперек волокон еще более сокращается при циклических переменных воздействиях, отвердевшая же клеевая прослойка при ее низкой гигроскопичности не снижает своей длительной прочности. Следствие этого — более раннее появление трещин в древесине, к тому же разгружающих клеевую прослойку. При качественных клеевых прослойках трещины должны появляться только в древесине клееных элементов между их клеевыми швами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Иванов Ю. М. Стесненное набухание древесины при циклическом изменении влажности // Лесн. журн.— 1983.— № 5.— С. 78—81. (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Иванов Ю. М. О влиянии лигноуглеводной матрицы на прочностные свойства древесины // Химия древесины.— 1983.— № 6.— С. 102—104. [3]. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. Длительная прочность древесины на растяжение поперек волокон // Строительство и архитектура.— 1986.— № 10.— С. 22—26. [4]. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. К методике прогнозирования длительной прочности соединений древесины на фенольных клеях // Лесн. журн.— 1987.— № 4.— С. 66—71. (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Лиелпньш М. Г., Эриньш П. П., Веверис А. Г. Сшивание березовой древесины хлорангидридом глутаровой кислоты // Химия древесины.— 1978.— № 6.— С. 19—27. [6]. Пичугина С. В., Разинская И. Н., Слущер А. И. Особенности кинетики разрушения сшитого полиметилметакрилата // Высокомолекулярные соединения.— 1978.— Т. Б 20, № 3.— С. 171—176. [7]. Цветков А. К. Исследование влияния температурно-влажностных воздействий на изменение внутренних напряжений в клееных деревянных конструкциях: Дис... канд. техн. наук.— М., 1977.— 168 с.

Поступила 1 марта 1988 г.

УДК 630*812.7

**ОБ УЧЕТЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПРИ НОРМИРОВАНИИ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОНСТРУКЦИОННЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

Е. Б. РЮМИНА, Г. Б. УСПЕНСКАЯ
ЦНИИМОД

Основная характеристика прочности древесины — расчетное сопротивление, при нормировании которого исходят из данных кратковременных испытаний пиломатериалов. Изменение прочности древесины при переходе от кратковременных стандартных испытаний к режиму нагружения в условиях эксплуатации учитывают введением коэффициента $m_{дл}$, зависящего от характера и длительности нагружения. Он определяется по результатам испытаний малых чистых образцов в эксплуатационных условиях с температурой не выше 35 °С и относительной влажностью воздуха не более 75 %.

При отклонении от нормальных температурно-влажностных условий вводят предусмотренные нормами коэффициенты условий работы, вычисленные по результатам кратковременных испытаний на прочность малых чистых образцов древесины. Поскольку прочность материала — величина случайная, то нормативные и расчетные сопротивления задают с некоторой обеспеченностью, равной соответственно 0,95 и 0,99, что определяет необходимость оценки прочности крайних, наиболее слабых образцов выборки, а не их средних значений, как принято в настоящее время.

Для оценки правомерности существующего подхода к нормированию расчетных характеристик конструктивных пиломатериалов выполнен статистический анализ результатов испытаний малых чистых образцов древесины сосны и пиломатериалов, полученных рядом авторов [1—9], при различных видах напряженного состояния и температурно-влажностных условий.

Т а б л и ц а 1

Вид напряженного состояния	Влажность W , %	Критерий Стьюдента* для аппроксимирующей функции		
		нормальной	логнормальной	Вейбулла
Изгиб	8,0 ... 12,0	1,010	0,609	1,741
	12,1 ... 15,0	0,729	0,429	1,610
	15,1 ... 17,9	0,548	0,317	1,198
	18,0 ... 21,0	0,603	1,809	1,026
	21,4 ... 30,0	0,304	0,364	0,370
Сжатие	4,0 ... 6,0	0,408	0,397	0,633
	6,4 ... 10,0	1,009	0,549	1,229
	10,4 ... 13,0	1,048	0,589	2,045
	13,4 ... 16,0	0,691	0,464	1,494
	16,6 ... 19,0	0,382	0,484	0,668
Растяжение	19,5 ... 24,7	0,383	0,545	0,40
	8,0	0,718	0,602	1,232
	16,0	0,824	1,092	0,542

* Критерий Стьюдента $t_{кр} = 1,96$.