

тельном диапазоне. В зависимости от вида синтетических клеев варьирование нормативной прочности, при уровне обеспеченности 0,95 и нормальном законе распределения выборок без измерений, имеющих большие погрешности, ограничено пределами от 21,06 до 24,01 МПа. Разница между указанными пределами составляет 12,2 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1]. Закс Л. Статистическое оценивание.— М.: Статистика, 1976. [2]. Знаменский Е. М. К нормированию расчетных сопротивлений конструкционной древесины // Исследование зависимости прочности деревянных конструкций от их изготовления.— М.: ЦНИИСК, 1982. [3]. Прочность деревянных клееных конструкций серийного изготовления / Л. М. Ковальчук, Ю. Ю. Славик, Е. М. Знаменский и др. // Стр-во и архит.— 1978.— № 12.— (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 20 июля 1987 г.

УДК 630\*812.7

### СНИЖЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ СТЕСНЕННЫХ ВЛАЖНОСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

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

ЦНИИСК

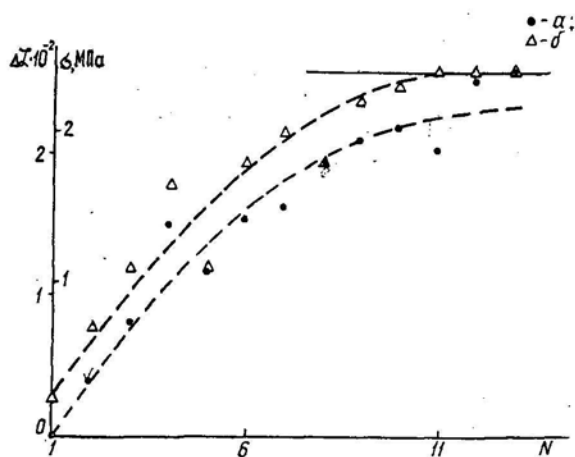
Исследование процесса снижения прочности древесины имеет существенное значение, поскольку знание материального носителя тех или других ее свойств позволяет предсказывать поведение этого сложного естественного полимера в различных эксплуатационных и производственных условиях.

При циклических влажностных воздействиях, как отмечалось в работе [9]\*, наблюдается постепенное укорочение упруго-закрепленных образцов древесины, т. е. усадка. Рост ее свидетельствует о внутренних изменениях в древесине, чувствительный показатель которых — давление набухания — падает [5], указывая на происходящее при этом увеличение концентрации заблокированных (не разрывающихся при увлажнении) физических связей. Намечающееся после некоторого числа циклов (см. рис.) затухание суммарного (с начала опыта) приращения усадочных деформаций ( $a$ ) проявляется при мало меняющейся амплитуде напряжения  $\sigma^+$  ( $b$ ) [9]; усталостные явления при таком малом числе циклов ( $N = 10$ ), очевидно, не имеют места.

Повышение концентрации физических связей, казалось бы, не должно снизить прочность древесины. Экспериментально установлено, однако, что рост концентрации поперечных связей неизбежно ухудшает подвижность полимерных цепей, приводя к сокращению времени до разрушения полимера. Опыты по сшиванию полиметилметакрилата (ПММА) [12] показали возрастание локальных перенапряжений (т. е. увеличение напряженности связей, ответственных за прочность) и падение прочности полимера при повышении концентрации сшивателя и густоты сетки сшивания с соответствующим уменьшением массы звена полимерных цепей между поперечными сшивками.

Описанный результат сшивания зафиксирован и в опытах с древесиной, в которых увеличение плотности поперечных связей и, следовательно, жесткости лигноуглеводной матрицы приводило к снижению

\* В работе [9] ошибочно указаны «мм» в размерности  $\Delta L$  на рис. 2, 3 и в таблице.



Изменение суммарного приращения усадочных деформаций  $\Delta L$  (а) и амплитуды напряжения  $\sigma^+$  (б) в упруго-закрепленном образце древесины сосны в зависимости от числа циклов  $N$  влажностных воздействий (увлажнение водяными парами, толщина упругой пластинки 1 мм)

прочности древесины на растяжение вдоль волокон ([11], стр. 26). В этом выразилось косвенное влияние на прочность древесины аморфной матрицы, соединенной через гемицеллюлозы физическими связями с высокоориентированной целлюлозой, определяющей прочность древесины [6]. Отсюда можно сделать вывод, что основной момент механизма снижения прочности полимерных веществ, в том числе древесины, — наличие двух различных систем связей — основных, ответственных за прочность полимера, и поперечных. От концентрации последних зависит степень локальной перенапряженности первых.

Снижение прочности твердого полимерного тела в результате сшивания, т. е. при увеличении концентрации поперечных связей [12], количественно определяется повышением коэффициента  $\gamma$  в уравнении (1) долговечности [2]

$$t = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}} \quad (1)$$

или

$$\lg t = \lg A - \alpha\sigma, \quad (2)$$

$$\text{где} \quad \alpha = \frac{\gamma}{2,3RT}; \quad \lg A = \frac{U_0}{2,3RT} + \lg \tau_0, \quad (3)$$

и соответственно уменьшением числителя показателя степени в (1) и времени до разрушения  $t$ .

В формулах (1) — (3) обозначено:

$U_0$  — начальная энергия активации процесса разрушения, кДж/моль;

$\tau_0$  — период тепловых колебаний атомов, с;

$\sigma$  — напряжение, МПа;

$t$  — время до разрушения (долговечность), с;

$\gamma$  — структурно-чувствительный коэффициент, кДж/(моль  $\times$  МПа);

$R$  — характеристика теплового движения (газовая постоянная), кДж/(моль  $\cdot$  град);

$T$  — температура, К.

Описанный эффект накладывается, очевидно, на базовый процесс накопления повреждений, обусловленный (при заданной температуре) кинетическими параметрами  $U_0$  и  $\tau_0$  данного твердого полимерного тела, удобным показателем которых может служить  $\lg A$ , согласно выражению (3).

Отрезок  $\lg A$ , отсекаемый прямой длительной прочности древесины по уравнению (2) на оси  $\lg t$ , равен 17,1 (при  $\sim 20^\circ\text{C}$ ) для древесины разных пород из испытаний различной продолжительности на растяжение, сжатие [4] и сдвиг вдоль волокон. Такое же значение  $\lg A$  показывает целлюлоза: согласно опытам с вискозными волокнами [3], получены значения  $U_0 = 168$  кДж/моль;  $\lg \tau_0 = -13$ , для которых (при  $\sim 20^\circ\text{C}$ )  $\lg A = \frac{168}{2,3RT} - 13 = 17$ , что совпадает с приведенной величиной  $\lg A$  для древесины. Этим также подтверждается вывод, что основной высокоориентированный компонент — природная целлюлоза — ответствен за прочность древесины.

Значение  $U_0$  можно найти, согласно (1), например, из машинных испытаний древесины в абс. сухом состоянии при разной температуре. При содержании связанной влаги  $\omega = 0$  древесина имеет постоянный коэффициент  $\gamma$ , не зависящий от температуры. Определив  $\gamma_i$  по формуле (4), вытекающей из (1),

$$\gamma_i = \frac{U_0 - 2,3RT(\lg t' - \lg \tau_0)}{\sigma_i} \quad (4)$$

для отдельных пар значений  $T_1$  и  $T_2$ ,  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и приравняв  $\gamma_1 = \gamma_2$ , из выражения (5) ( $t'$  — среднее время до разрушения в данных испытаниях) вычисляем

$$U_0 = \frac{2,3R(\lg t' - \lg \tau_0)(T_2\sigma_1 - T_1\sigma_2)}{\sigma_2 - \sigma_1} \quad (5)$$

По величине  $U_0$  находим  $\lg A$  из (3). Использованные для этого результаты [1] машинных испытаний древесины дуба на сжатие и растяжение вдоль волокон при  $\omega = 0$  и температурах от  $25$  до  $100^\circ\text{C}$  (значения  $\sigma_i$  взяты с графиков  $\sigma_i(t^0)$ ;  $\lg t' = 2,0$  для сжатия и  $0,63$  — для растяжения) дали  $U_0 = 167,27 \pm 5,3$  и  $177,87 \pm 23,6$  кДж/моль соответственно (табл. 1 и 2). С увеличением числа испытанных образцов значение  $U_0$  приближается к теоретической величине.

Таблица 1

Результаты машинных испытаний древесины дуба на сжатие вдоль волокон (при  $\omega = 0$  и разной температуре  $T$ )

| Т, К | $\sigma_i$ , МПа                             | Т, К | $\sigma_i$ , МПа                             | Т, К | $\sigma_i$ , МПа                             | Общее уравнение и доверительные интервалы |
|------|--|------|--|------|--|---|
| 298  | 90,0<br>86,4<br>85,4<br>83,8<br>82,5         | 328  | 82,0<br>81,7<br>81,2<br>80,3<br>79,4<br>73,0 | 363  | 72,0<br>68,0<br>67,2<br>67,2<br>66,3<br>63,6 |   |
| 308  | 88,6<br>86,4<br>84,3<br>82,5<br>82,0<br>78,0 | 333  | 80,9<br>80,1<br>75,0<br>72,0                 | 373  | 68,4<br>67,2<br>66,7<br>65,7<br>65,2         |   |
| 318  | 85,7<br>84,5<br>82,1<br>76,7                 | 343  | 78,6<br>78,4<br>76,7<br>72,5<br>70,6<br>68,5 |      | 61,6<br>60,0<br>59,0<br>58,1                 |   |
| 323  | 84,5<br>83,1<br>82,9<br>79,0<br>74,4<br>74,0 | 353  | 73,2<br>71,4<br>71,1<br>70,6<br>68,2<br>66,7 |      |  |   |

Таблица 2

Результаты машинных испытаний древесины дуба на растяжение вдоль волокон (при  $\omega = 0$  и разной температуре  $T$ )

| Т, К | $\sigma$ , МПа                                  | Т, К | $\sigma$ , МПа                               | Т, К | $\sigma$ , МПа  | Общее уравнение и доверительные интервалы |
|------|---|------|--|------|---|---|
| 298  | 122,7<br>119,1<br>109,5<br>97,1<br>92,5<br>87,5 | 328  | 113,6<br>108,0<br>81,7<br>67,5               | 373  | 102,5<br>96,8<br>94,5<br>89,5<br>71,7<br>69,4<br>67,2<br>46,6 |   |
| 308  | 94,5<br>92,8<br>78,8<br>77,0                    | 343  | 98,8<br>97,1<br>85,6<br>82,5<br>77,3<br>72,6 |      |   |   |
| 318  | 115,0<br>103,5<br>97,4<br>93,4<br>78,2          | 358  | 92,0<br>87,0<br>90,6                         |      |   |   |

Действие растягивающих напряжений поперек волокон в отличие от действия напряжений вдоль волокон характеризуется укороченным временем до разрушения (т. е. более высоким темпом относительного снижения прочности древесины под нагрузкой во времени) и соответственно меньшей величиной отрезка  $\lg A'$  оси  $\lg t$ . Согласно сделанному нами анализу результатов испытаний древесины лжетсуги на растяжение поперек волокон, проведенных в Канаде Б. Мэдсенем [8, 13], величина  $\lg A' = 10,214 \pm 0,696$  (при 25 °С) вместо  $\lg A = 17,1$  вдоль волокон (при 20 °С). Значения энергии связей, ответственных за прочность, соответствующие этому сравнению, составляют:  $U'_0 = 126$  (поперек волокон) и  $U_0 = 170$  кДж/моль (вдоль), если в выражение (3) подставить одинаковые величины  $\lg \tau_0 = -13^*$ .

Таблица 3

| Материал                                | Вид испытания | L     | M     | $\lg_{\text{сyt}} A =$<br>$= L/M$ | $\lg_c A'$ |
|---|---------------|-------|-------|-----------------------------------|------------|
| ДСП трехслойная (карбамидное связующее) | Изгиб         | 0,807 | 0,136 | 5,93                              | 10,87      |
| ДСП трехслойная (фенольное связующее)   | »             | 0,708 | 0,122 | 5,81                              | 10,75      |
| ДВП                                     | »             | 0,701 | 0,102 | 6,88                              | 11,82      |
| ДСП трехслойная (карбамидное связующее) | Сжатие        | 0,712 | 0,111 | 6,40                              | 11,34      |
| ДСП трехслойная (фенольное связующее)   | »             | 0,719 | 0,113 | 6,36                              | 11,30      |
| ДВП                                     | »             | 0,739 | 0,114 | 6,48                              | 11,42      |
| ДСП трехслойная (карбамидное связующее) | Растяжение    | 0,711 | 0,115 | 6,18                              | 11,12      |
| ДСП трехслойная (фенольное связующее)   | »             | 0,715 | 0,117 | 6,12                              | 11,06      |
| ДВП                                     | »             | 0,719 | 0,108 | 6,66                              | 11,60      |

11,25 ± 0,56

\*  $\lg \tau'_0$  для растяжения поперек волокон должен иметь меньшую величину, которая может быть установлена из тщательно поставленных испытаний древесины длительной нагрузкой при разной температуре. Поскольку точно неизвестна величина  $\lg \tau_0$ , как и  $U_0$ , то далее будем сравнивать зависящие от этих параметров (при данной  $T$ ) значения отрезков  $\lg A'$  с отрезком  $\lg A$  для растяжения вдоль волокон.

По уровню своей энергии связи, разрывающиеся при растяжении древесины поперек волокон, близки (судя по величине отрезка  $\lg A'$ ) к связям, нарушаемым, например, при разрушении образцов древесных материалов.

В табл. 3 приведены значения  $\lg A'$ , полученные из корреляционных уравнений  $\sigma = L - M \lg t$  [10] по результатам испытаний длительной нарузкой образцов древесноволокнистых плит (ДВП) и древесностружечных плит (ДСП) при разных видах напряжений и обычной температуре. Примерно так же определяют связи, преодолеваемые в процессе развития вынужденных высокоэластических деформаций: подставив в выражение (3) значения  $E_0 = 117$  кДж/моль и  $\lg \tau'_0 = \lg \frac{1}{\varepsilon_0} = -9$  получают  $\lg A' = 11,4$  [7].

Большая разница в энергии связей, разрывающихся при растяжении вдоль и поперек волокон, естественно, приводит к предположению о том, что растяжению поперек волокон древесины препятствуют, по-видимому, физические связи [7]. Но тогда не ясно, каким образом реализуется эффект сшивания, наблюдающийся при описанных циклических изменениях стесненных влажностных деформаций древесины как результат наличия систем связей двух видов. По имеющимся экспериментальным данным можно высказать гипотезу о том, что основой механизма описанного снижения прочности древесины может быть многозначность водородных связей по уровням энергии, изменяющейся в широких границах. Это послужило основанием различать слабые и сильные водородные связи. С этих позиций физические связи, увеличение концентрации которых ухудшает молекулярную подвижность целлюлозы в древесине при стесненных влажностных деформациях, логично характеризовать как слабые водородные связи, а отвечающие за прочность — как сильные.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Белянкин Ф. П. Механические характеристики древесины дуба и сосны при разных гидротермических состояниях // Тр. Инст. механики АН УССР (на укр. яз.).— 1939.— № 38.— 123 с. [2]. Журков С. Н. Проблема прочности твердых тел // Вестн. АН СССР.— 1957.— Вып. 11.— С. 78—82. [3]. Журков С. Н., Абасов С. А. Роль химических и межмолекулярных связей при разрыве полимеров // Высокомолек. соедин.— 1961.— Т. 3, № 3.— С. 450—455. [4]. Иванов Ю. М. Длительная прочность древесины // Лесн. журн.— 1972.— № 4.— С. 76—82.— (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Иванов Ю. М. Стесненное набухание древесины при циклическом изменении влажности // Лесн. журн.— 1983.— № 5.— С. 78—81.— (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Иванов Ю. М. О влиянии лигноуглеводной матрицы на прочностные свойства древесины // Химия древесины.— 1983.— № 6.— С. 102—104. [7]. Иванов Ю. М. Изменение механизма разрушения по структурным направлениям у ориентированного неоднородного полимера // Высокомолек. соедин.— Т. Б28, № 11.— С. 835—838. [8]. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю. Длительная прочность древесины при растяжении поперек волокон // Строительство и архитектура.— 1986.— № 10.— С. 22—26.— / Изв. высш. учеб. заведений. [9]. Иванов Ю. М., Славик Ю. Ю., Цветков А. К. Влияние циклического изменения влажностных деформаций на процесс накопления повреждений в древесине клееных конструкций // Лесн. журн.— 1989.— № 1.— С. 60—64.— (Изв. высш. учеб. заведений). [10]. Кондратенко Б. Е. Исследование прочности и деформативности панелей с обшивками из древесных материалов для домов заводского изготовления: Автореф. дис. канд. техн. наук.— М., 1980.— 23 с. [11]. Лиепиньш М. Г., Эриньш П. П., Веврис А. Г. Сшивание березовой древесины хлорангидридом глутаровой кислоты // Химия древесины.— 1978.— № 6.— С. 19—27. [12]. Пичугина С. В., Разинская И. Н., Слуцкер А. И. Особенности кинетики разрушения сшитого ПММА // Высокомолек. соедин.— 1973.— Т. Б20, № 3.— С. 171—176. [13]. Madsen B. Duration of load tests for wood in tension perpendicular to grain // Forest Products Journal.— 1975.— V. 25, N 8.— P. 48—54.

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.27.026.5

### ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ КОНТАКТНОЙ СУШКИ КАРТОНА

А. П. БЕЛЬСКИЙ, В. Ю. ЛАКОМКИН

Ленинградский технологический институт ЦБП

Сушка капиллярно-пористых коллоидных материалов является не только теплофизическим, но и технологическим процессом, при протекании которого изменяются физико-механические свойства материала. Так, неоправданная интенсификация процесса сушки приводит к ухудшению качественных показателей материала (коробление, расслаивание и др.). Причина ухудшения свойств готового изделия — развитие объемно-напряженного состояния высушиваемого материала свыше предельно допустимого, обусловленного реологическими свойствами материала [4], а основная причина развития объемно-напряженного состояния влажного тела при его сушке — неравномерное распределение влагосодержания и температуры по толщине. Поэтому для оптимизации процесса сушки необходимо знать перепады влагосодержания в центре материала и на поверхности ( $u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}$ ) и температуры ( $t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}$ ) по толщине материала.

Нестационарное поле влагосодержания при сушке бумаги и картона описывается уравнением теплопроводности, а поле температуры — уравнением теплопроводности. Их аналитическое решение представляет значительные трудности.

Цель данной работы — найти упрощенную критериальную зависимость для расчета поля влагосодержания в процессе сушки плоских материалов при наличии градиента температуры. Известно [5], что градиент температуры оказывает дополнительное сопротивление переносу влаги от центральных слоев тела к поверхностным. Поэтому при наличии градиента температуры  $\frac{dt}{dx}$  перепад влагосодержания ( $u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}$ ) больше, чем когда градиент температуры отсутствует.

Запишем дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с учетом термовлагопроводности для одномерной задачи при условии, что градиент давления отсутствует ( $\frac{dp}{dx} = 0$ ):

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \delta_t \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

где  $a_m$  — коэффициент массопроводности материала;  
 $\delta_t$  — термоградиентный коэффициент;  
 $\tau$  — длительность сушки;  
 $x$  — координата.

Аппроксимируем распределение температуры и влагосодержания по толщине тела параболой:

$$u(x) = u_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R^2} (u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}); \quad (2)$$

$$t(x) = t_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R^2} (t_{\text{ц}} - t_{\text{п}}). \quad (3)$$