

А. А. Барташевич, академик РАЕН, профессор,  
Л. В. Игнатювич, канд. техн. наук, доцент, С. В. Шетько, канд. техн. наук, БГТУ

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЙ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

We researched the influence of the temperature fluctuation of the environment and the atmospheric moisture capacity including the most unfavourable of their combination and the change of durability of adhesive strength. In this case there are given the recommendations of changing the minings of the parameters of the regims of gluing wood and wooden materials.

**Введение.** При склеивании заготовок в щиты и блоки, получении прямолинейных заготовок методом склеивания отрезков древесины по ширине, толщине и длине, склеивании заготовок из шпона с одновременным гнутьем, всех видах облицовывания температуру воздуха принимают не менее 18°C, а относительную влажность воздуха не более 65% [1]

Нередко указывают и другие условия склеивания. Так, фирма Kleiberit (Германия), выпускающая разнообразные клеи, которые применяются и в Беларуси, рекомендует температуру в помещениях, где производится склеивание, держать в пределах 15–20°C, а относительную влажность воздуха – в пределах 40–60%. Допускается и более высокая, чем 20°C, температура, но тогда меняется время открытой выдержки клея, а также время его полимеризации, то есть продолжительность прессования в процессе склеивания.

Температура склеиваемых элементов должна быть такой же, как и температура в помещении. Для этого склеиваемые материалы должны кондиционироваться в течение длительного времени. После склеивания заготовки могут обрабатываться не раньше чем через 3 сут. Такая выдержка после склеивания необходима в целях выравнивания внутренних напряжений, а также влажности по сечению заготовок [4, 5].

Выдерживать в течение года стабильные (с небольшими отклонениями) показатели температуры и относительной влажности воздуха не получается. Например, если температура воздуха летом равна 30°C, то примерно такая же температура и в цеху, где производится склеивание. В цехах деревообработки, как правило, не существует кондиционирования воздуха. В осенне-весенний период в цех подается воздух из окружающей среды, то есть с той же его относительной влажностью, а в сырую погоду она может достигать 90%, значительно превышая рекомендуемую технологическими режимами.

В связи со сказанным ставилась задача провести исследования физико-механических свойств клеевых швов (соединений) в зависимости от температуры и влажности воздуха при их формировании.

**Основная часть. Методика исследований.** В соответствии с поставленной целью были проведены физико-механические испытания

клеевых соединений, полученных при склеивании древесины бука. Склеивание производилось с использованием распространенных поливинилацетатных клеев:

1) поливинилацетатной дисперсии (ГОСТ 18992), выпускаемой Лидским лакокрасочным заводом;

2) марки Клебит 303, выпускаемого фирмой Kleiberit (Германия).

Обе марки клеев пригодны для горячего и холодного склеивания. Применяются для склеивания древесины, слоистых плит, шиповых соединений, при облицовывании щитовых деталей и др.

Клеи могут обеспечивать группы нагрузок Д1, Д2.

Испытания производились в соответствии с ГОСТ 15613.1 «Методы определения предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон». Этот метод идентичен методу DIN EN 205 «Установление прочности при продольном скалывании в результате проведения испытаний на растяжение».

Образцы для испытаний были изготовлены из древесины бука. Каждый образец представлял две пластинки длиной 150 мм, шириной 20 мм и толщиной 5 мм каждая, склеенные по пластям. Через 3 сут в них были сделаны прорезы на всю ширину и толщину пластинок таким образом, чтобы расстояние между прорезами равнялось 10 мм. Площадь склеивания по клеевому слою при этом составляла 200 мм<sup>2</sup>.

Заготовки для образцов и клеи выдерживались в течение 7 сут при условиях, установленных методикой испытаний. Склеивание и выдержка образцов после склеивания производились также при тех же условиях.

Температурно-влажностные условия создавались и поддерживались в замкнутом объеме, имеющем электронагреватель (для создания необходимой повышенной температуры), кондиционер воздуха и оросительную систему (для создания повышенной влажности воздуха).

Технологический режим склеивания образцов был использован следующий:

- температура и относительная влажность воздуха – согласно В-плану опытов (табл. 1);
- вязкость клея по ВЗ-4, с, – 100–120;
- расход клея, г/м<sup>2</sup>, – 200;
- нанесение клея – двухстороннее;

– время открытой выдержки, мин, – 3, 5 и 10 (при относительной влажности воздуха, соответственно 40, 65 и 90%);

– продолжительность прессования, мин, – 40, 45 и 60 (при температуре воздуха соответственно 30, 22 и 14 °С);

– давление прессования, МПа, – 0,7.

Начальная влажность древесины, из которой изготавливались образцы для испытаний, находилась в пределах (10±1)%. После кондиционирования влажность образцов находилась в пределах (8–13)°С (меньшее значение – при относительной влажности воздуха 40%, большее – при относительной влажности воздуха 90%). В целом влажность древесины испытуемых образцов находилась в пределах значений, допускаемых технологическими режимами.

Для проведения опытов был составлен В-план второго порядка, при этом каждый из двух факторов варьировался на трех уровнях: –1; 0; +1 в нормализованных обозначениях (табл. 1).

Таблица 1

**В-план экспериментальных исследований**

№ опыта	Факторы в условных переменных		Факторы в явном виде	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	температура воздуха, °С	относительная влажность воздуха, %
1	–1	–1	14	40
2	+1	–1	30	40
3	–1	+1	14	90
4	+1	+1	30	90
5	–1	0	14	65
6	+1	0	30	65
7	0	–1	22	40
8	0	+1	22	90

Необходимое количество образцов для испытаний в каждом опыте определяем по формуле, принятой в деревообработке [2]:

$$n = \frac{t_v^2 \cdot V^2}{d_v^2}, \quad (1)$$

где  $t_v$  – квантиль распределения Стьюдента;  $V$  – коэффициент вариации показателя свойства древесины;  $d_v$  – относительная точность определения выборочного среднего с доверительной вероятностью;  $V$  – требуемая доверительная вероятность.

Значение  $d_v$  при  $V \geq 20\%$ , принимаем равным 10% при доверительной вероятности 0,95.

Коэффициент вариации при определении прочности на скалывание  $V = 20$ , тогда  $t_v = 2,093$ .

Находим

$$n = \frac{2,093^2 \cdot 20^2}{10^2} = 17,5.$$

Принимаем  $n = 18$  образцов.

**Результаты исследований.** Испытания на скалывание по клеевому слою проведены в соответствии с ГОСТ 15613.1. Результаты опытов даны в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты опытов по определению прочности клеевых соединений в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха**

№ опыта	Варьируемые факторы		Средние значения выходного фактора прочности на скалывание, МПа	
	температура воздуха, °С	относительная влажность воздуха, %	Клеи ПВА Лидского ЛКЗ	Клеи марки Клебит 303
1	14	40	11,0	11,5
2	30	40	10,7	10,4
3	14	90	9,4	9,0
4	30	90	9,8	9,6
5	14	65	10,5	11,2
6	30	65	11,3	10,4
7	22	40	12,1	12,6
8	22	90	10,9	10,3

Для двух переменных факторов уравнение регрессии 2-го порядка в условиях переменных имеет вид

$$y = V_0 + V_1x_1 + V_2x_2 + V_{11}x_1^2 + V_{22}x_2^2 + V_{12}x_1x_2. \quad (1)$$

Решения уравнения (1) имеют следующий вид:

Для клея ПВА Лидского лакокрасочного завода:

в условиях переменных

$$y = 0,412 + 0,838x_1 + 0,096x_2 - 0,02x_1^2 - 0,001x_2^2 - 0,001x_1x_2; \quad (2)$$

в явном виде

$$\sigma_{ск} = 0,412 + 0,838t + 0,096\phi - 0,02t^2 - 0,001\phi^2 + 0,001t\phi, \text{ МПа}. \quad (3)$$

Для клея марки Клебит 303:

в условиях переменных

$$y = 3,603 + 0,746x_1 + 0,056x_2 - 0,021x_1^2 - 0,001x_2^2 - 0,002x_1x_2 \quad (4)$$

в явном виде

$$\sigma_{ск} = 3,603 + 0,746t + 0,056\phi - 0,021t^2 - 0,001\phi^2 + 0,002t\phi, \text{ МПа} \quad (5)$$

В уравнениях (3) и (5) означают:

$t$  – температура воздуха, °С;  $\phi$  – относительная влажность воздуха, %;  $\sigma_{ск}$  – предел прочности на скалывание, МПа.

По уравнениям (3) и (5) построены графики зависимости прочности клеевых соединений от переменных изучаемых факторов (рис. 1 и 2).

$$z = 0,412 + 0,838*x + 0,096*y - 0,02*x*x + 0,001*x*y - 0,001*y*y$$

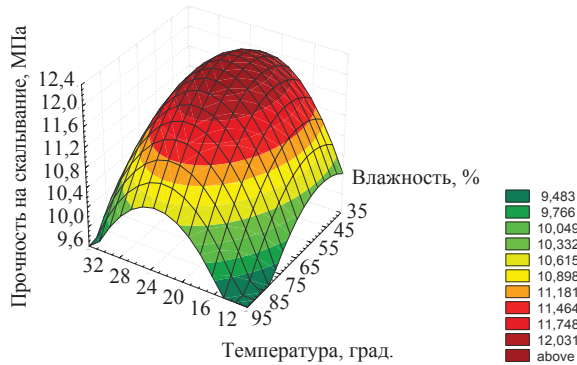


Рис. 1. Зависимость прочности клеевого соединения на скалывание вдоль волокон от температуры и относительной влажности воздуха для клея ПВА Лидского лакокрасочного завода

$$z = 3,603 + 0,746*x + 0,056*y - 0,021*x*x + 0,002*x*y - 0,001*y*y$$

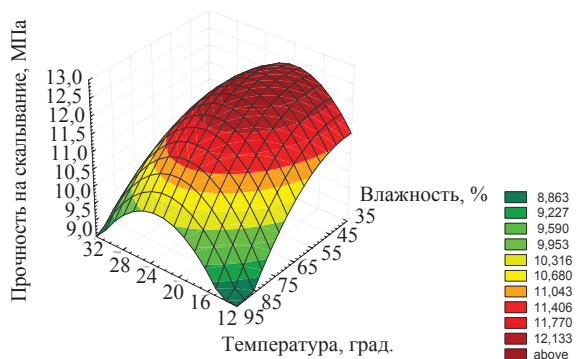


Рис. 2. Зависимость прочности клеевого соединения на скалывание вдоль волокон от температуры и относительной влажности воздуха для клея марки Клебит 303

Определим по формулам (3) и (5) значения прочности клеевых соединений при рекомендуемых значениях технологических факторов – температуры воздуха (примем  $t = 20^\circ\text{C}$ ) и относительной влажности воздуха (примем  $\varphi = 60\%$ ).

По формуле (3) имеем

$$\sigma_{\text{СК}} = 12,53 \text{ МПа.}$$

По формуле (5) имеем

$$\sigma_{\text{СК}} = 12,31 \text{ МПа.}$$

Как видим, при оптимальных значениях температуры и относительной влажности воздуха, при которых идет формирование клеевого соединения, обеспечивается наибольшая прочность склеивания.

Теперь определим прочность клеевых соединений при сочетании различных неблагоприятных факторов. В частности, примем в одном случае значение температуры воздуха  $14^\circ\text{C}$  и относительную влажность воздуха  $90\%$ , в другом соответственно  $30^\circ\text{C}$  и  $40\%$ .

В первом случае для клея Лидского лакокрасочного завода получим  $\sigma_{\text{СК}} = 7,5 \text{ МПа}$ , для клея марки Клебит 303  $\sigma_{\text{СК}} = 9,35 \text{ МПа}$ .

Во втором случае, то есть при температуре  $30^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $40\%$ , имеем: для клея Лидского лакокрасочного завода получим  $\sigma_{\text{СК}} = 9,79 \text{ МПа}$ , для клея марки Клебит 303  $\sigma_{\text{СК}} = 10,12 \text{ МПа}$ .

При значениях температуры  $30^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $90\%$  прочность склеивания клеем Клебит 303 равна  $9,42 \text{ МПа}$ .

Прочность клеевых соединений на скалывание по клеевому слою должна обеспечиваться не менее  $10,0 \text{ МПа}$ .

Таким образом, из приведенных данных видно, что при возможных неблагоприятных колебаниях в цехе температуры воздуха и относительной влажности воздуха прочность склеивания относительно максимального значения может уменьшиться на  $40\%$  (клей Лидского лакокрасочного завода) или на  $24\%$  (клей марки Клебит 303), на достигая при этом минимального допустимого значения.

Из графиков рис. 1 и 2, а также по формулам (3) и (5) можно определить прочность склеивания при любых других сочетаниях температуры и относительной влажности воздуха.

На передовых предприятиях существуют системы автоматического поддержания температурно-влажностного режима в производственных помещениях, что способствует поддержанию стабильных значений технологических параметров, а соответственно, и стабильному качеству продукции. К сожалению, пока можно привести только единственный пример – это ИП «Черный Красный Белый» – иностранное мебельное предприятие в Брестской экономической зоне.

**Закключение.** 1. Относительная влажность и температура воздуха, при которых формируется клеевое соединение, являются технологическими факторами и регламентируются технологическими режимами склеивания.

Относительная влажность воздуха во всех режимах рекомендуется в пределах  $60\text{--}65\%$  (не выше).

Температура воздуха рекомендуется величиной  $(20 \pm 2)\%$ .

2. В действительности, особенно в осенне-весенний период, относительная влажность воздуха колеблется в широких пределах и равна ее значению в открытом пространстве (доходит до  $90\%$  и даже больше).

Температура воздуха в летнее время может иметь значительно большие значения, чем рекомендуется, а в зимний период – меньшее значение (при плохом отоплении зданий).

3. Наиболее неблагоприятные сочетания исследуемых двух факторов – это низкая или высокая температура и высокая относительная влажность воздуха. В этом случае не обеспечивается даже среднее значение допускаемой прочности клеевых соединений.

4. При низкой температуре воздуха клей имеет, как правило, пониженную вязкость и плохое растекание, хуже заполняет поры древесины, не обеспечивает максимальный контакт склеиваемых поверхностей. Повышенная влажность воздуха ведет к повышению влажности склеиваемой древесины (увлажняется больше всего поверхность древесины, то есть именно та, которая образует контакт с клеевым слоем). Кроме того, при повышенной влажности воздуха идет замедленный процесс удаления влаги из заготовок с нанесенным клеем во время открытой технологической выдержки (до начала прессования).

5. При повышенной температуре воздуха вязкость клея уменьшается, и тогда возможно его меньшее нанесение на поверхность; увеличивается также впитываемость в древесину. При влажности воздуха, близкой к нормативной или меньшей, и повышенной температуре возможна чрезмерная подсушка клея во время открытой технологической выдержки.

6. При отклонении значений температуры и влажности воздуха от нормативных необходимо вносить коррективы в значения других технологических факторов, а именно:

А именно при повышенной температуре воздуха и влажности, не превышающей 65%, время открытой выдержки после нанесения клея необходимо сокращать (с учетом марки клея, вида склеиваемого материала, величины превышения температуры от оптимального значения равного 20°C).

Исходная рабочая вязкость клея при этом может быть несколько увеличенной.

При повышенных температуре и влажности воздуха корректировку продолжительности открытой выдержки можно не делать, так как действие двух факторов ( $t$  и  $\varphi$ ) прямо противоположны.

При пониженной температуре и повышенной влажности воздуха следует увеличить продолжительность открытой выдержки до прессования, продолжительность выдержки под давлением во время склеивания и продолжительность технологической выдержки после прессования. Вязкость клея можно незначительно уменьшить, а наносить клей лучше на две склеиваемые поверхности (при склеивании брусовых элементов это возможно).

### Литература

1. Барташевич, А. А. Технология изделий из древесины: учебник / А. А. Барташевич, В. В. Богомазов. – Минск: Вышэйшая школа, 1995. – 362 с.
2. Боровиков, А. М. Справочник по древесине / А. М. Боровиков, Б. Н. Уголев. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
3. Пижурич, Ан. А. Основы научных исследований в деревообработке / Ан. А. Пижурич, Ал. А. Пижурич. – М.: МГУЛ, 2005. – 305 с.
4. Серговский, П. С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П. С. Серговский. – М.: Лесная промышленность, 1968. – 448 с.
5. Справочник мебельщика / под ред. В. П. Бухтиярова. – М.: МГУЛ, 2005. – 600 с.