

Полученные результаты позволяют учитывать динамические эффекты взаимосвязанной термоупругости при интенсивной тепловой обработке древесины и композиционных материалов на его основе.

Abstract

PHENOMEN OF THERMAL INERTIA IN THE WOOD

S. N. Kulman.

The article presents data from a study of temperature and power mechanisms of the nonlinear dynamics of deformation and destruction of timber. It is shown that in the short time intervals into account the finite speed of propagation of thermal perturbations lead to qualitative differences. In the long period of time the solution is asymptotically coincides with the solutions based on the Fourier equation.

The results allow to take into account the dynamic effects of the interconnected thermoelasticity under intensive heat treatment of wood and composite materials on its basis.

УДК 624.011.14; 625.142.21

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СКЛЕИВАНИЯ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ**

Мазаник Н. В., доцент; Божелко И. К.

(Белорусский государственный технологический университет)

Выполнен анализ свойств клеев, потенциально пригодных для производства составных деревянных шпал. Проведены циклические испытания клеевых соединений на устойчивость к ускоренному старению в условиях переменных температурно-влажностных воздействий. Определена зависимость прочности клеевого соединения на основе клея ФРФ-50 от параметров режима склеивания. Произведена оптимизация режима склеивания.

Рациональность использования древесного сырья является одним из важнейших факторов, влияющих на конкурентоспособность деревообрабатывающих предприятий. Особенно актуален данный аспект для производств, в которых полезный выход основной продукции ограничен в силу ее специфики, например при производстве крупномерных сортиментов, таких как шпалы, столбы, рудничные стойки и т. п. Проблема усугубляется тем

фактом, что для выработки подобных изделий используется сырье крупных диаметров, количество которого в Республике Беларусь весьма ограничено. Кроме того, известно, что стоимость сырья с диаметром более 26 см существенно выше по сравнению со стоимостью пиловочника, обычно используемого на лесопильных заводах.

Вышеупомянутые факты являются причиной того, что в последние годы все большую популярность приобретает идея составных деревянных конструкций, в которых крупномерные элементы изготавливаются из нескольких деталей меньшего размера. Это позволяет, во-первых, вовлечь в производство более дешевое тонкомерное сырье, а во-вторых – повысить качество конечной продукции за счет камерной сушки и более глубокой биозащитной пропитки элементов малой толщины.

Так, в настоящее время известно достаточно много патентов на конструкции составных деревянных шпал для железнодорожных путей. Следует однако отметить, что подавляющее большинство предлагаемых в них решений отличается сложностью и высокой себестоимостью изготовления, что связано с применением дорогостоящих крепежных элементов либо обвязок. Поэтому подобные шпалы не нашли широкого применения на практике. В этой связи становится очевидным, что положительный экономический эффект может быть достигнут исключительно при использовании наиболее простых и низкочастотных способов соединения, таких, например, как клеевые.

Железнодорожные составные шпалы представляют собой ответственные изделия, к которым предъявляются высокие требования, в числе которых:

- прочность клеевого соединения, которая не должна быть ниже средней прочности древесины на скалывание;
- высокая водостойкость клеевого шва (класс эксплуатации D4);
- высокая устойчивость клеевого соединения к старению в условиях переменных температурно-влажностных воздействий;
- стойкость клеевого соединения к вибрационным нагрузкам, которые могут иметь место при эксплуатации шпал в железнодорожном пути.

Во многом схожие требования выдвигаются к клеям, применяемым для склеивания несущих деревянных конструкций. Анализ научно-технической литературы позволил установить, что наиболее широко используемыми в производстве клееных деревянных конструкций являются резорциновые, фенольно-резорциновые, поливинилацетатные и полиуретановые клеи. При этом фенольно-резорциновые связующие зарекомендовали себя как обеспечивающие наиболее долговечные клеевые соединения при эксплуатации под действием различных атмосферных воздействий, в том числе при эксплуатации в районах с нормальным холодным климатом. Соединения древесины на резорциновых и фенольно-резорциновых клеях отличаются также высокой стойкостью к ускоренному старению и вибрационным нагрузкам, а прочность клеевых соединений на скалывание может достигать 15–16 МПа. В то же время, развернутая информация о поведении клеевых швов в условиях,

приближенных к эксплуатационным для железнодорожных шпал, отсутствует, равно как и четкие рекомендации по режимам склеивания. Последний факт обусловлен тем, что оптимальные параметры режима склеивания существенно зависят от свойств клея конкретного производителя.

Целью нашей работы стало сравнение прочностных свойств клеев, потенциально пригодных для склеивания элементов составной шпалы. В качестве таких связующих рассматривались: фенольно-резорциновый клей ФРФ-50 производства НПО «Карбохим» (Российская Федерация); поливинилацетатная дисперсия Kleiberit 314.3 производства Klebchemie M.G.Becker GmbH & Co. KG (Германия); полиуретановый клей Kleiberit PUR 501.0 производства Klebchemie M.G.Becker GmbH & Co. KG (Германия). Склеиванию подвергались сосновые образцы влажностью 8%. Режимы склеивания приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы склеивания

Параметр	Марка клея		
	ФРФ-50	Kleiberit 314.3	Kleiberit PUR 501.0
Расход клея, г/м ²	240	150	200
Время открытой выдержки, мин	7	5	20
Давление склеивания, МПа	0,4	0,4	0,7
Продолжительность закрытой выдержки под давлением, ч	10	20	1
Температура склеивания, °С	20±2	20±2	20±2
Продолжительность выдержки после склеивания до начала испытаний, ч	24	24	24

Программа испытаний включала определение прочности клеевых соединений на скалывание вдоль волокон, причем для каждого клея 20 образцов подвергались испытанию непосредственно после склеивания, еще 20 – после прохождения 40 циклов температурно-влажностных воздействий, ускоряющих старение клеевых швов. Один цикл ускоренного старения согласно ГОСТ 33120-2014 включал следующие операции:

1) образцы помещали в сосуд и на 20 ч заливали водой, имеющей температуру (20±2)°С, таким образом, чтобы они были покрыты водой на 2–3 см;

2) извлеченные из воды мокрые образцы переносили в морозильную камеру и выдерживали в течение 6 ч при температуре минус (20±2)°С;

3) замороженные образцы, извлеченные из морозильной камеры, раскладывали на стеллажах и оставляли оттаивать в течение 16 ч при температуре воздуха (20±2)°С;

4) после оттаивания образцы помещали в сушильную камеру и

выдерживали в ней 6 ч при температуре $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ и влажности воздуха $(60-75)\%$.

Контроль влажности образцов, их нагревание и выдержку при определенной температуре осуществляли с использованием низкотемпературной лабораторной электропечи SNOL 67/350. Заморозка, оттаивание и кондиционирование опытных образцов проводились в климатической камере ТХВ 225. Перед проведением механических испытаний образцы, прошедшие температурно-влажностные воздействия, подсушивали при температуре плюс 40°C до достижения ими первоначальной влажности.

Относительную прочность клеевых соединений рассчитывали с погрешностью 1% по формуле:

$$A = \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{\text{к}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{д}}$ – среднее арифметическое результатов испытаний образцов после циклических температурно-влажностных воздействий; $\sigma_{\text{к}}$ – среднее арифметическое результатов испытаний контрольных образцов.

Группу стойкости клеевых соединений к циклическим температурно-влажностным воздействиям определяют в зависимости от их относительной прочности:

- при А до 30% – низкая стойкость;
- при А от 30% до 60% – средняя стойкость;
- при А более 60% – повышенная стойкость.

Прочность образцов на скалывание определялась в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 33120-2014 «Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений». Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Расчетная относительная прочность клеевых соединений для клея ФРФ-50 составила 79,25%, для Kleiberit 314.3 – 39,58%, для Kleiberit PUR 501.0 – 60,94%.

Таблица 2. Результаты испытаний прочности клеевых соединений

Марка клея	Среднее значение прочности клеевых соединений на скалывание вдоль волокон, МПа по результатам испытаний 20 сосновых образцов	
	не подвергавшихся циклам ускоренного старения	после 40 циклов ускоренного старения по ГОСТ 33120-2014
ФРФ-50	5,3	4,2
Kleiberit 314.3	4,9	1,9
Kleiberit PUR 501.0	6,4	3,9

Анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать

следующие выводы:

– максимальный предел прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины был получен при использовании полиуретанового клея Kleiberit PUR 501.0 и составил 6,4 МПа;

– несколько меньшее значение предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины было получено при использовании фенольно-резорцинового клея ФРФ-50 – 5,3 МПа, что составляет 78,1% от прочности, полученной для клея Kleiberit PUR 501.0;

– минимальный предел прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины был получен при использовании поливинилацетатным клеем Kleiberit 314.3 и составил 4,8 МПа или 75% от прочности, полученной для клея Kleiberit PUR 501.0;

– в большинстве случаев разрушение клеевого соединения носило когезионный характер и происходило по древесине, что указывает на возможное занижение прочностного показателя соединения из-за ограниченной прочности самой древесины сосны. Тем не менее, поскольку для изготовления шпалопродукции используется древесина сосны и ели, проведение дополнительных испытаний с использованием твердолиственных пород не является необходимым;

– максимальную стойкость к циклическим температурно-влажностным воздействиям ($A=79,25\%$) показали клеевые соединения, полученные при использовании фенольно-резорцинового клея ФРФ-50. Их стойкость может быть классифицирована по ГОСТ 33121-2014 как повышенная.

Следующим этапом исследований стало изучение влияния влажности древесины при склеивании на прочность получаемого клеевого шва. Как известно, сушка толстомерных древесных сортиментов сопряжена с рядом трудностей, таких как: необходимость использования очень мягких режимов сушки, что существенно увеличивает продолжительность процесса и может спровоцировать поражение древесины различными видами плесневых, деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов; низкая производительность сушильных камер; необходимость тщательного контроля за параметрами сушильного агента и наличия систем их автоматического регулирования, отличающихся низкой инертностью и повышенной точностью, что предполагает использование дорогостоящего сушильного оборудования; существенные потери материала из-за растрескивания в процессе камерной сушки. Из вышеизложенного следует, что возможность склеивания элементов шпалы при их влажности выше 8–12% будет являться существенным преимуществом.

По некоторым литературным данным, фенольно-резорциновые клеи допускают склеивание древесины с повышенной влажностью, однако конкретные экспериментальные данные, из которых можно было бы сделать вывод о предельно допустимой влажности при склеивании, в литературе отсутствуют. Поэтому решено было провести эксперимент, целью которого

является определение зависимости прочности клеевого соединения на основе клея ФРФ-50 от влажности древесины, подвергаемой склеиванию. Испытания проводились в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 33120-2014 «Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений». Каждый опыт проводился в пяти повторениях (табл. 3).

Таблица 3. Результаты испытания предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон для образцов, склеенных клеем ФРФ-50 при различных значениях влажности

Номер образца	Влажность образца, %	Расход клея, г/м ²	Площадь клеевого соединения, м ²	Разрушающая нагрузка, Н	Предел прочности клеевого соединения, МПа	Среднее значение предела прочности клеевого соединения, МПа
1	8	220	0,0006	3120	5,3	5,3
2	8	220	0,0006	2760	6,1	
3	8	220	0,0006	2940	5,8	
4	8	220	0,0006	3120	4,7	
5	8	220	0,0006	3660	4,8	
6	15	220	0,0006	2760	5,1	5,1
7	15	220	0,0006	2880	4,9	
8	15	220	0,0006	2880	5,1	
9	15	220	0,0006	3360	5,1	
10	15	220	0,0006	3660	5,4	
11	20	220	0,0006	2700	5,2	5,2
12	20	220	0,0006	2820	5,4	
13	20	220	0,0006	3240	5,1	
14	20	220	0,0006	2760	5,0	
15	20	220	0,0006	3180	5,3	
16	25	220	0,0006	3720	5,4	5,5
17	25	220	0,0006	3780	5,6	
18	25	220	0,0006	3360	5,2	
19	25	220	0,0006	2940	4,9	
20	25	220	0,0006	3720	6,4	

В результате эксперимента было установлено, что прочность клеевых соединений с фенольно-резорциновым клеем ФРФ-50 при варьировании влажности древесины в диапазоне от 8 до 25% изменяется незначительно и составляет 5,1–5,3 МПа.

Одной из наиболее существенных проблем применения резорцинового клея

ФРФ-50 для склеивания элементов составной клееной шпалы является отсутствие отработанного режима склеивания, разработанного с учетом характеристик резорциновой смолы конкретного производителя и требований к конечному качеству клеевого шва. Поскольку влияние параметров склеивания на выходной параметр качества представляется не очевидным, для получения математической модели следует прибегнуть в эмпирическом моделировании на основе экспериментальных данных. Кроме того, т. к. основной задачей является оптимизация математической модели, данная модель должна представлять собой как минимум полином второй степени. Это влечет необходимость применения плана эксперимента второго порядка, который позволяет сформулировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома.

Формулированию плана эксперимента предшествовал выбор его входных и выходных факторов. В качестве переменных управляемых входных факторов эксперимента были приняты: расход клея, x_1 , г/м²; давление склеивания, x_2 , МПа; продолжительность закрытой выдержки под давлением, x_3 , ч. В качестве постоянных управляемых входных факторов эксперимента принимали: влажность древесины при склеивании, %; шероховатость поверхности склеиваемых элементов; температуру клеевого шва при склеивании, °С; продолжительность открытой выдержки перед склеиванием, мин; продолжительность выдержки после склеивания, ч. В качестве постоянных измеряемых входных факторов эксперимента учитывали: температуру и влажность воздуха в помещении, в котором проводилось склеивание; характеристики компонентов клеевого состава. В качестве выходного параметра, y , использовался предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа.

Чтобы определить все коэффициенты уравнения регрессии, необходимо реализовать план эксперимента, в котором каждый фактор варьируется не менее чем на трех уровнях. Для построения матрицы планирования В-плана за основу был принят полный факторный план ПФЭ 2³, дополненный 6 звездными точками. Реализация эксперимента осуществлялась в соответствии с матрицей, записанной с использованием натуральных значений переменных факторов (табл. 4). Каждый опыт выполнялся в трех повторениях.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием программ Microsoft Office Excel 2007 и MathCAD 14 Portable. В этих же программах была выполнена проверка адекватности выведенного уравнения регрессии. В результате была получена математическая модель зависимости выходного параметра от переменных факторов в натуральных значениях:

$$y = -3.38127 + 0.051218 \cdot x_1 + 11.55143 \cdot x_2 + 0.081467 \cdot x_3 - 0.0001113 \cdot x_1^2 - 9.57143 \cdot x_2^2 - 0.00366 \cdot x_3^2$$

Таблица 4. Результаты реализации трехфакторного эксперимента по определению оптимального режима склеивания в соответствии с матрицей В-плана

Номер опыта	Переменные факторы			Среднее значение предела прочности клевого соединения при скалывании вдоль волокон, y , МПа
	расход клея, x_1 , г/м ²	давление, x_2 , МПа	продолжительность выдержки, x_3 , ч	
1	120	0,3	24,0	3,61
2	350	1,0	24,0	2,73
3	120	1,0	24,0	3,00
4	350	0,3	24,0	3,35
5	120	0,3	3,0	3,97
6	350	1,0	3,0	3,09
7	120	1,0	3,0	3,35
8	350	0,3	3,0	3,74
9	235	0,3	10,5	5,56
10	235	1,0	10,5	4,94
11	235	0,65	3,0	6,18
12	235	0,65	24,0	5,82
13	120	0,65	10,5	5,08
14	350	0,65	10,5	4,82

Оптимизация математической модели в MathCAD 14 Portable позволила определить значения переменных факторов, обеспечивающих максимум выходного параметра. Было установлено, что максимальное значение предела прочности клевого соединения при скалывании вдоль волокон может быть получено при следующих значениях параметров склеивания: расход клея – 221 г/м²; давление прессования – 0,48 МПа; – продолжительность выдержки под давлением – 12,4 ч.

Таким образом, подводя итоги выполненных исследований, можно сделать следующие выводы. При производстве составных деревянных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях переменных температуры и влажности, может быть рекомендовано использование фенольно-резорцинового клея ФРФ-50. Данный клей обеспечивает требуемую прочность клевого соединения на скалывание и имеет повышенную стойкость к циклическим температурно-влажностным воздействиям. Кроме того, склеивание клеем ФРФ-50 может производиться при транспортной влажности древесины, что позволяет повысить гибкость и вариативность технологического процесса.

Список литературы

1. Ярцев В.П., Киселева О.А. Прогнозирование поведения строительных

материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации : учебное пособие / В.П. Ярцев, О.А. Киселева. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 124 с.

2. Ефимов В.А., Петрова А.П., Аниховская Л.И. Ускоренные испытания клеевых соединений / В.А. Ефимов, А.П. Петрова, Л.И. Аниховская // «Клеи. Герметики. Технологии». – 2005. – №7.

3. ГОСТ 33120-2014 Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений.

4. ГОСТ 33121-2014 Конструкции деревянные клееные. Методы определения стойкости клеевых соединений к температурно-влажностным воздействиям.

Анотація

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ СКЛЕЮВАННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СКЛАДОВИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЕКСПЛУАТОВАНИХ В ЖОРСТКИХ УМОВАХ

Мазаник Н. В., Божелко І. К.

Виконано аналіз властивостей клеїв, потенційно придатних для виробництва складових дерев'яних шпал. Проведено циклічні випробування клейових з'єднань на стійкість до прискореного старіння в умовах змінних температуро-вологісних впливів. Визначено залежність міцності клейового з'єднання на основі клею ФРФ-50 від параметрів режиму склеювання. Проведена оптимізація режиму склеювання.

Abstract

OPTIMIZATION OF THE BONDING MODE DURING THE PRODUCTION OF COMPOSITE WOODEN STRUCTURES OPERATING UNDER SEVERE CONDITIONS

Mazanik N., Bozhelko I.

The analysis of the properties of adhesives, potentially suitable for the production of composite wood sleepers is made. Cyclic tests of adhesive joints in regard to their resistance to accelerated aging under variable temperature and humidity conditions are conducted. The dependence of the strength of the bond obtained with the adhesive FGF-50 from the bonding mode is determined. The optimal parameters of bonding mode are shown.