УДК 674.028.9

ПОЛУЧЕНИЕ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ КЛЕЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Попов В.М., Латынин А.В.., Швырев А.Н.

ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж, e-mail: etgvgita@mail.ru.

На современных деревоперерабатывающих предприятиях предъявляются повышенные требования к прочности изделий из клееной древесины. В статье приведены результаты опытных исследований по влиянию постоянного электрического поля на клеи, применяемые для склеивания древесины. Уставлено, что обработка полимерного компонента клея постоянным электрическим полем повышает его клеящие способности. Клеевые соединения древесины, сформированные на электрообработанном клее, обладают более высокой прочностью. Методом рентгеноструктурного анализа обработанного в электрическом поле и необработанного клея выявлены изменения структуры в сторону упорядочения расположения его элементов и уменьшения межатомного расстояния. Эти структурные изменения способствуют снятию внутренних напряжений и переходу атомов в более выгодное энергетическое состояние. Изменение структуры модифицированного электрическим полем клея сопровождается формированием клеевых соединений древесины повышенной прочности.

Ключевые слова: электрическое поле, модификация, клеевые соединения, напряженность поля, прочность, древесина

PRODUCTION OF EXTRA STRENGTH GLUED WOOD ON THE BASIS OF ADHESIVE, MODIFIED BY ELECTRIC FIELD

Popov V.M., Latynin A.V., Shvyrev A.N.

FSBEI HPE «Voronezh State Academy of Forestry and Technologies», Voronezh, e-mail: etgvgita@mail.ru.

In modern wood processing enterprises increased demands on the strength of glued wood products are given. The results of experimental studies on the influence of a constant electric field on the adhesives used for gluing wood are given in this article. It is established that the processing of the adhesive polymer component in a constant electric field increases its adhesive ability. Glued joints of wood, formed on electrically processed glue, have higher strength. By the method of X-ray diffraction and structure analysis of processed and non-processed in an electric field glues reveals revealed structural changes in the direction of the ordered arrangement of its elements and the decrease of interatomic distances. These structural changes contribute to the removal of internal stresses and the transition of atoms into a more favorable energy state. Changes in the structure of the glue modified by electric field is accompanied by the formation of adhesive wood joints of extra strength.

Keywords: electric field, modification, adhesive joints, field stress, strength, wood

Значительный объем готовой продукции на современных деревоперерабатывающих предприятиях составляют изделия из клееной древесины. Склеивание применяется при производстве мебели, щитового паркета, фанеры, несущих и ограждающих конструкций, в сборном домостроении. Во многих случаях и особенно при склеивании конструкций из массивной древесины перед технологами ставится задача создания клеевых соединений повышенной прочности. В то же время используемые в настоящее время клеи и технологии склеивания не позволяют получать удовлетворяющие по прочности современным требованиям клеевые соединения древесины. Решение данной проблемы требует разработки новой технологии склеивания, в основу которой заложено использование модифицированных клеев.

Учитывая, что применяемые в деревообработке клеи имеют полимерную основу, рассмотрим состояние вопроса с модификацией полимеров электрическим полем. Так, в работе [2] экспериментально установлено значительное повышение адгезионной прочности, в частности, полимерных покрытий, подвергнутых воздействию электрическим полем в процессе их формирования на металлической подложке. Отсюда следует ожидать также повышения прочности клеевых соединений древесины при обработке клея в постоянном электрическом поле [5, 6]. Для проведения исследований по влиянию электрического поля на свойства клеев создана высоковольтная установка, состоящая из рабочей ячейки в виде двух обкладок конденсатора, питаемого током через повышающий трансформатор. Напряженность электрического поля в рабочей ячейке изменяется в пределах от 0 до 1800 В/см. В рабочую ячейку помещается кювета из фторопласта, которая заполняется полимерным компонентом клеев КФЖ или КФ–МТ–15. Обработка полимерного компонента проводилась при заданной на-

пряженности поля в течение 15 мин. Затем обработанный компонент клея соединялся с отвердителем и полученный клей наносился на поверхности образцов из дуба, используемых после отверждения клеевой прослойки в испытаниях предела прочности на скалывание вдоль волокон $\sigma_в$ согласно ГОСТ 156 13. 1–84 на испытательной машине ИР–50–3. Результаты проведенных испытаний приведены на рис. 1.

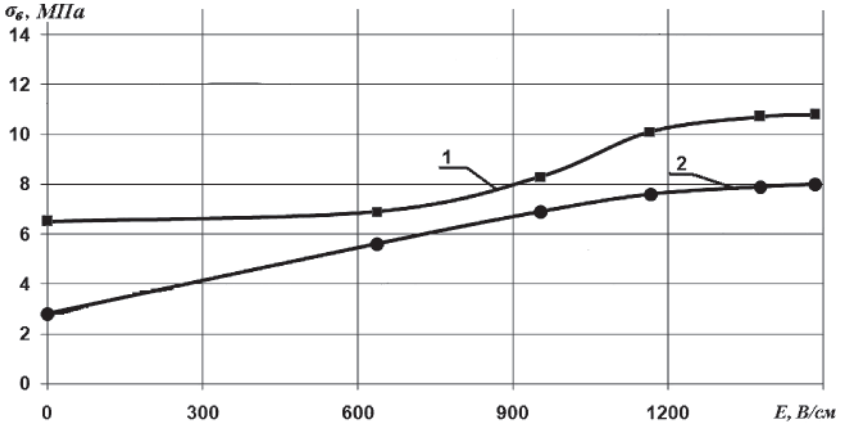

Рис. 1. Зависимость предела прочности клеевого соединения на скалывание от напряженности электрического поля: 1 – клей КФ-Ж; 2 – клей КФ-МТ-15

Из анализа рис. 1 видно, что обработанные в электрическом поле клеи создают клеевые соединения более высокой прочности по сравнению с необработанными. При этом повышение напряженности электрического поля до $E = 1500$ В/см увеличивает прочность клеевых соединений на скалывание для образцов из дуба на клее КФЖ на 66 % и на клее КФ–МТ–15 почти вдвое.

Для установления механизма процесса повышения прочности клеевого соединения древесины, сформированного на основе электрообработанного клея, проведены сравнительные исследования структуры необработанного и подвергнутого воздействию электрического поля клея. Для этого использовался метод рентгеноструктурного анализа. Как известно, в его основе заложено взаимодействие рентгеновского излучения с электронами в данном случае полимерной основы клея, в результате которого возникает дифракция рентгеновских лучей. Смолу двухкомпонентного клея (КФЖ или КФ–МТ–15) подвергали воздействию в течение 15 мин электрическим полем напряженностью 1480 В/см. Затем обработанную смолу соединяли с отвердителем и после отверждения клея осуществляли рентгеноструктурный анализ. Одновременно исследовался и необработанный клей.

Кривые интенсивности рассеянного рентгеновского излучения У(2θ)на образцах до и после обработки электрическим клеем измерялись на стандартном дифрактометре в геометрии отражения с использованием фокусировки по Брэггу–Брентано [7]. Для измерения интенсивности при больших значениях волнового вектора $k = \varphi\pi\sin\theta/\lambda$ в качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка с медным анодом (длина волны характеристического излучения $\lambda = 0{,}1542$ нм). Съемку кривых У(2θ) проводили в режиме «регистрация по точкам». Для клея КФЖ интервал съемки составлял 2–35°, шаг сканирования выбирался равным 0,02°. Относительная погрешность измеренной интенсивности рентгеновского излучения не превышала 5 %.

Рентгеновское излучение при рассеянии на образце и на монохроматоре частично поляризуется. Фактор поляризации можно выразить в виде:

$$P(2\theta) = \frac{У + \cos^2(2\,\theta)\cos^2(2\alpha)}{2}, \quad (1)$$

где 2θ – угол дифракции на образце; 2α – угол дифракции на монохроматоре.

Измеренная интенсивность рассеянного рентгеновского излучения $У_0(2\theta)$ корректировалась с учетом поправки на поляризацию:

$$У_э(K) = \frac{У_0(2)\,\theta}{P(2)\theta}. \quad (2)$$

Структурные факторы рассчитывались по методу Набитовича [4]. Данный метод позволяет выделить интенсивность когерентного рассеянного и вычесть прочие составляющие измеренной интенсивности рентгеновского излучения [8].

Кривая $У_э(k)$должна осциллировать вокруг некой плавной функции $У_c(k)$, т.е. сред-

ней интенсивности, которая получилась бы в аналогичных аппаратурных условиях при рассеянии рентгеновского излучения на такой же системе, но из независимых атомов. Тогда кривая $\frac{У_э(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$ также будет осциллировать вокруг кривой $\frac{У_с(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$. Здесь C_i – концентрация; f_i – атомный фактор рассеяния i-го элемента, входящего в состав исследуемого клея. Функция $\frac{У_с(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$ определялась графически путем построения графика функции $\frac{У_э(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$ в зависимости от K и проведения кривой $\frac{У_с(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$ так, чтобы удовлетворялось условие

$$\int_{K_{мин}}^{K_{макс}} \frac{У_э(K)}{\sum_i c_i f_i^2(K)} dk = \int_{K_{мин}}^{K_{макс}} \frac{У_э(K)}{\sum_i c_i f_i^2(K)} dk. \quad (3)$$

Для этого функция $\frac{У_э(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$ аппроксимировалась по методу наименьших квадратов многочленом четвертой степени. Полученная аппроксимирующая кривая принималась за функцию $\frac{У_с(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}$.

Структурный фактор $S(k)$ рассчитывался по формуле

$$S(k) = \frac{У}{B}\left[\frac{У_э(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)} - \frac{У_с(k)}{\sum_i c_i f_i^2(k)}\right], \quad (4)$$

где B – нормирующий множитель, который подбирался таким образом, чтобы значение функции на начальном участке перед первым пиком было равно нулю.

Приведенную функцию радиального распределения $G(r)$ можно вычислить с помощью синус-преобразования Фурье структурного фактора:

$$G(r) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty k\left[S(k) - 1\right]\sin(kr)\,dk. \quad (5)$$

Однако непосредственное применение этой формулы чувствительно к экспериментальным погрешностям в определении. Для снижения вклада этих ошибок использовался алгоритм [3], когда сначала экспериментальная функция $S(k)$ – 1сглаживается путем разложения по набору базисных функций, а затем производится обращение сглаженного решения по формуле (5). В качестве базисных функций были использованы волновые пакеты, локализованные в области каждого пика функции $S(k)$ [8].

$$\varphi(x) = Mx^{\beta}e^{-\alpha x}\cos(nRx),$$

где M – масштабный множитель; α, β и R – параметры, определяющие положение соответствующего максимума функции $S(k)$ и его характерную ширину.

Как следует из работы [1], использование регуляризирующих процедур, основанных на сглаживании структурного фактора путем разложения его по базисному набору функций, существенно повышает точность восстановления профиля функции $G(r)$ и обеспечивает устойчивость к случайным ошибкам эксперимента. Функция $G(r)$ связана с локальной атомной плотностью $\rho(r)$ следующим соотношением:

$$G(r) = 4\pi r[c(r) - c_o], \quad (6)$$

где ρ_0 – средняя атомная плотность.

Таким образом, функция $G(r)$ характеризует отклонение локальной атомной плотности на расстоянии r от средней атомной плотности.

Парная функция радиального распределения находится отношением локальной атомной плотности на расстоянии r к средней атомной плотности, т.е.

$$g(r) = \frac{C(r)}{C_0}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены дифрактограммы клея КФЖ до и после обработки электрическим полем. Они имеют вид, типичный для некристаллических веществ, а именно, широкий первый пик с последующим медленным спадом интенсивности.

Из рис. 3 видно, что после приложения электрического поля в структуре клея произошли изменения. Положение первого пика сместилось в сторону больших углов, а также появились два субпика на правой стороне основного пика и исчез небольшой субпик на левой стороне. Изменение вида структурных факторов $S(k)$ после приложения электрического тока подчиняется тем же закономерностям, что и изменение вида кривых У(2θ) на рис. 2.

На рис. 4 представлены приведенные функции радиального распределения клея КФЖ до и после обработки электрическим полем. Первый и второй максимумы функции $G(r)$ после приложения электрического поля сместились влево, что свидетельствует об уменьшении средних межмолекулярных

расстояний от 0,602 до 0,502 нм. Таким образом, как следует из рентгеноструктурного анализа, обработка клея электрическим полем приводит к изменению его структуры, при этом уменьшаются межатомные расстояния. Об этом можно судить по смещению пиков $G(r)$ в сторону уменьшения r. Для клея КФЖ этот эффект достаточно хорошо выражен, поскольку основное расстояние уменьшилось на 20%. Структура клея достаточно сложна, чтобы с высокой степенью подробности определить, какие именно из атомов полимерных молекул сближаются. Однако правомерно предположить, что причиной сближения рентгенорассеивающих атомов является дополнительное электростатическое притяжение, наведенное электрическим полем.

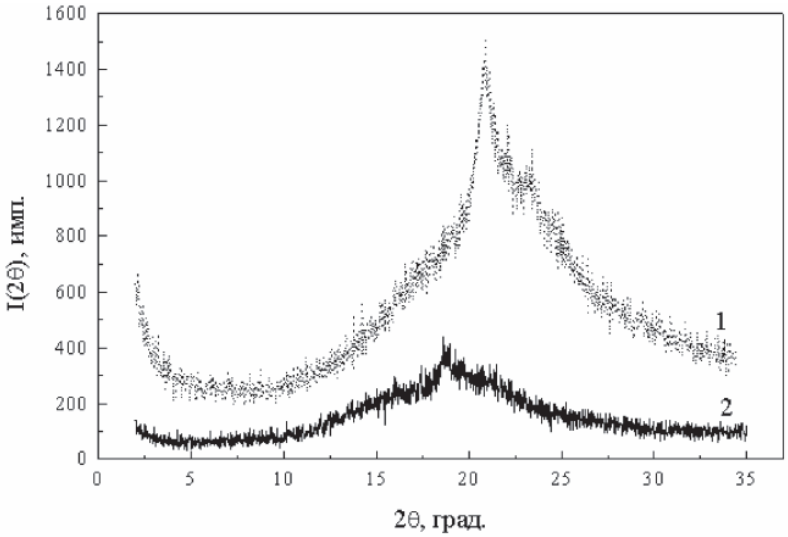

Рис. 2. Дифрактограммы клея КФ–Ж:
1 – после обработки электрическим полем; 2 – без обработки

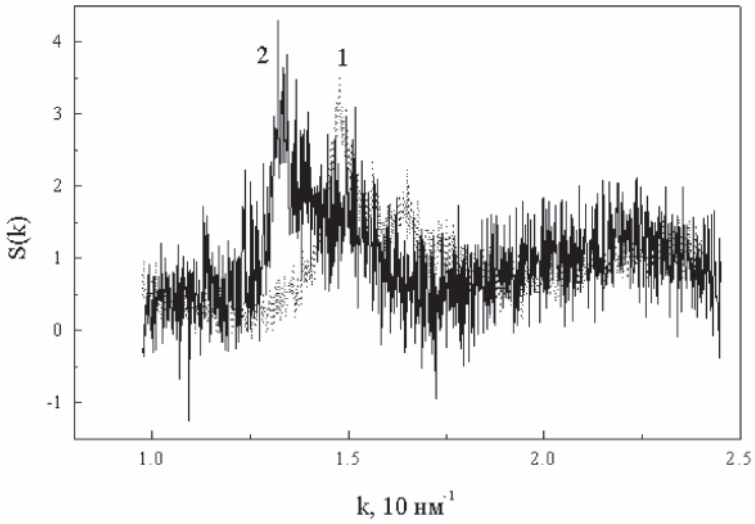

Рис. 3. Структурные факторы клея КФ-Ж:
1 – после обработки электрическим полем; 2 – без обработки

Рентгеноструктурный анализ также свидетельствует об увеличении структурной упорядоченности. Об этом говорит повышение и сужение структурных пиков. Если исходить из величины роста высот пиков, то степень упорядочения структуры повышается примерно на 20%. Увеличение упорядоченности означает, что структура клея находится в менее напряженном, т.е. более равновесном состоянии. Очевидно, что под действием внешнего электрического поля существующий порядок в расположении атомов изменился и некоторые из них в молекулах клея сместились под действием поля и перешли в более выгодное локальное энергетическое состояние.

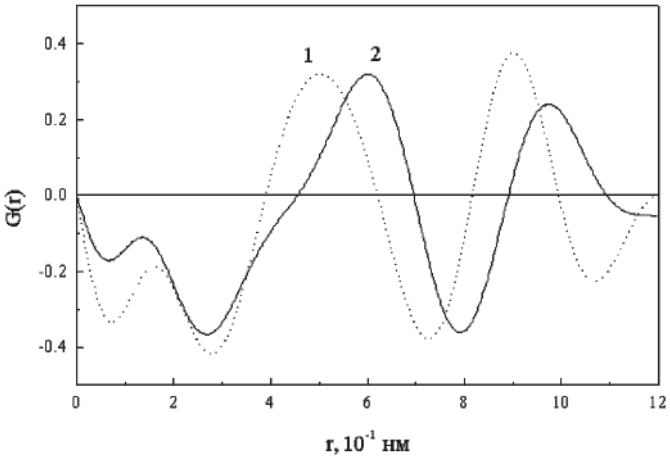

Рис. 4. Приведенные функции радиального распределения клея КФ–Ж: 1 – после обработки электрическим полем; 2 – без обработки

Таким образом, установленные структурные изменения клея под действием электрического поля являются основной причиной повышения прочности клеевых соединений древесины, сформированных на его основе.

Список литературы

1. Батаронов И.Л., Бондарев А.В., Бармин Ю.В. Анализ экспериментальной интерференционной функции методом волновых патентов // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2004. – Т. 68.– №7.– С. 1058–1060.

2. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. – М.: Химия, 1980. – 224 с.

3. Крылов А.С., Щедрин Б.М. Численный метод нахождения функции радиального распределения // Кристаллография. – 1989. – Т.34, №5. – С. 1088–1093.

4. Набитович И.Д., Стециив Я.И., Волощук Я.В. Определение когерентной интенсивности и фона по экспериментальной кривой рассеяния электронов/ Кристаллография. – 1967. –Т.12, №4. – С. 584–590.

5. Попов В.М., Платонов А.Д., Шендриков М.А. Способ получения клееной древесины повышенной прочности // МГУЛ «Лесной вестник». – 2007. – №6. – С. 123–125.

6. Влияние магнитного и электрического полей на прочность клееной древесины / В.М. Попов, М.А. Шендриков, А.В. Иванов, М.А. Жабин // Вестник МГУЛ «Лесной вестник».– 2009.– №4. – С. 122–126.

7. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. – М.: Высшая школа, 1980. – 328 с.

8. Шелехов Е.В., Скопов Ю.А. Рентгеновская дифрактометрия при исследовании ближнего порядка в аморфных сплавах // Заводская лаборатория. – 1988. – Т. 54, №5. – С. 34–45.

References

1. Bataronov I.L., Bondarev A.V., Barmin Ju.V. Analiz ehksperimental'nojj interferen-cionnojj funkcii metodom volnovykh patentov/ Izv. RAN. Ser. fizicheskaja. 2004. T. 68. no. 7. pp. 1058–1060.

2. Kestel'man V.N. Fizicheskie metody modifikacii polimernykh materialov. M.: Khi-mija, 1980. 224 p.

3. Krylov A.S., Shhedrin B.M. Chislennyjj metod nakhozhdenija funkcii radial'nogo ras-predelenija/ Kristallografija. 1989. T. 34. no. 5. pp. 1088–1093.

4. Nabitovich I.D., Steciv Ja.I., Voloshhuk Ja.V. Opredelenie kogerentnojj intensivnosti i fona po ehksperimental'nojj krivojj rassejanija ehlektronov/ Kristallografija. 1967. T.12. no. 4. pp. 584–590.

5. Popov V.M., Platonov A.D., Shendrikov M.A. Sposob poluchenija kleenojj drevesiny povyshennojj prochnosti / MGUL. «Lesnojj vestnik». 2007. no. 6. pp. 123–125.

6. Popov V.M., Shendrikov M.A., Ivanov A.V., Zhabin M.A. Vlijanie magnitnogo i ehlek-tricheskogo polejj na prochnost' kleenojj drevesiny / Vestnik MGUL «Lesnojj vestnik». 2009. no. 4 pp. 122–126.

7. Skryshevskijj A.F. Strukturnyjj analiz zhidkostejj i amorfnykh tel. M.: Vysshaja shko-la. 1980. 328 p.

8. Shelekhov E.V., Skopov Ju.A. Rentgenovskaja difraktometrija pri issledovanii blizhne-go porjadka v amorfnykh splavakh / Zavodskaja laboratorija. 1988. T. 54. no. 5. pp. 34–45.

Рецензенты:

Филимонова О.Н., д.т.н., профессор кафедры инженерной экологии и техногенной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий, г. Воронеж;

Никулин С.С., д.т.н., профессор кафедры инженерной экологии и техногенной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий, г. Воронеж.

Работа поступила в редакцию 23.02.2012