

УДК 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН В ЛИСТВЕННИЧНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛАХ ПРИ СУШКЕ

Ш.Г. Зарипов, д-р техн. наук, доц.

Филиал Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

Трещины различного вида – наиболее часто встречающиеся пороки сушки в лиственничных пиломатериалах. Многочисленными исследованиями установлено, что указанный вид порока зависит от многих факторов. Поэтому необходима систематизация этих факторов с целью установить степень значимости каждого. Исследования показали, что основные факторы, оказывающие влияние на формирование трещин в лиственничных пиломатериалах при сушке, целесообразно разделить на три группы, которые в той или иной степени зависят от структуры древесины. Первая (основная) группа факторов связана с наличием в древесине лиственницы значительного количества сердцевинных лучей. В пиломатериалах смешанной распиловки они выступают как концентраторы напряжений, что приводит к возникновению трещин при сушке. В пиломатериалах радиальной распиловки наличие сердцевинных лучей упрочняет конструкцию доски. В результате вероятность появления трещин в этой группе пиломатериалов многократно снижается. Действие второй и третьей групп факторов обусловлено распределением связанной влаги по сечению доски. Цель данной работы – проведение систематизации факторов, которая позволила бы выстраивать технологический процесс сушки лиственничных пиломатериалов таким образом, чтобы максимально снизить вероятность появления трещин.

Ключевые слова: трещина, лиственничные пиломатериалы, жесткость, сердцевинные лучи, распределение связанной влаги.

Введение

В основе изучения целостности и разрушения при сушке конструкции пиломатериалов, включая лиственничные, лежит оценка соотношения предела их прочности и действующих на них разрушающих напряжений. Для сохранения целостности конструкцию необходимо либо упрочнять, либо снижать действующие напряжения.

В настоящее время разработано достаточно большое количество феноменологических моделей, объясняющих разрушение пиломатериалов при сушке. В подавляющем большинстве моделей изучается развитие напряжений первого рода, уравниваемых в пределах больших объемов древесины, соизмеримых с объемами сортимента [4, 7, 11 и др.]. Такой подход позволяет установить влияние изменения количества связанной влаги на возникновение растягивающих напряжений в высушиваемых пиломатериалах. Однако при

Для цитирования: Зарипов Ш.Г. Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в лиственничных пиломатериалах при сушке // Лесн. журн. 2018. № 3. С. 127–136. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

этом не учитываются особенности деформирования отдельных элементов древесины лиственницы в определенных температурно-временных интервалах.

Решение проблемы целостности доски при сушке усложняется переменными значениями действующих растягивающих напряжений и прочности самой древесины, которые наблюдаются на фоне деструктивных процессов. Поэтому целостность пиломатериалов при сушке может быть обеспечена при всестороннем учете факторов, оказывающих влияние на возникновение трещин.

Ранее проведенные исследования показали [6, 12], что при простом механическом воздействии на связи такого полимерного материала, как древесина, ей придается широкий набор свойств: от свойств высоковязкой жидкости до свойств, присущих хрупкому стеклу. Поэтому при изменении характера поведения имеющейся совокупности цепей в определенных температурно-временных интервалах следует ожидать протекания различных деформационных процессов.

Следовательно, при изучении процессов образования трещин необходимо учитывать физическое состояние древесины, которое зависит от ее температуры и влажности, скорости воздействия напряжений растяжения, а также дополнительное растягивающее воздействие на определенный элемент древесины, связанное с недопущением такого явления, как поперечное коробление.

Цель данной работы – систематизация факторов сушки лиственничных пиломатериалов, что позволит выстраивать технологический процесс таким образом, чтобы максимально снизить вероятность появления трещин.

Объекты и методы исследования

Нами был проведен комплекс экспериментальных исследований, который позволил установить основные стадии разрушения древесины лиственницы при конвективной сушке: от зарождения магистральной трещины в виде микротрещины до ее затухания (рис. 1).

Развитие магистральной трещины происходит за счет образования новых микротрещин, которые формируются путем разрушения сердцевинных лучей с некоторым смещением их относительно друг друга (рис. 2).

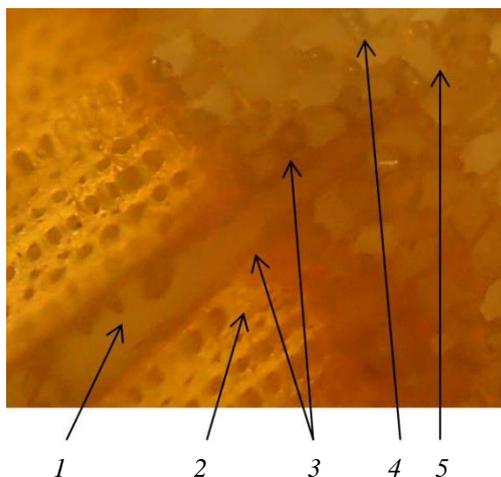


Рис. 1. Микрофотография зарождения микротрещины усушки: 1 – микротрещина; 2 – поздняя древесина годичного слоя; 3 – границы микротрещины; 4 – ранняя древесина годичного слоя; 5 – вершина микротрещины

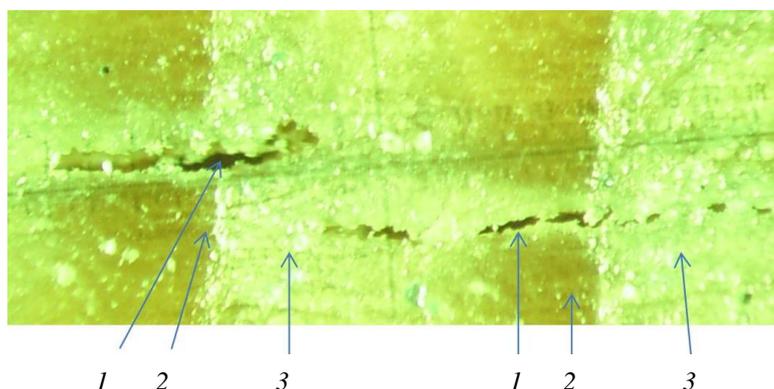


Рис. 2. Распространение микротрещин: 1 – микротрещина; 2 – поздняя древесина годичного слоя; 3 – ранняя древесина годичного слоя

В результате формируется магистральная трещина усушки, ориентированная строго по сердцевинному лучу (рис. 3).

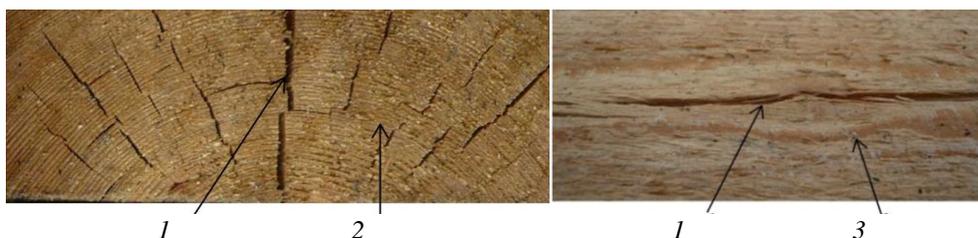


Рис. 3. Формирование магистральной трещины усушки (1) в торце (2) и на пласти (3) доски из древесины лиственницы

Были проведены механические испытания образцов лиственничных пиломатериалов на разрывной машине ИР-100. Факторы и пределы варьирования: температура нагрева древесины $t_d = 20, 50, 75$ °С; скорость нагружения $v_n = 0,1; 1,0$ кН/с; влажность древесины $W_d \approx 5; \geq 30$ %. Выходные параметры – модули упругости при растяжении в тангенциальном и радиальном направлениях.

Результаты проведенных механических испытаний позволили получить численные значения модуля упругости древесины лиственницы при растяжении в тангенциальном и радиальном направлениях (рис. 4).

Результаты исследования и их обсуждение

Для более полного представления о причинно-следственной связи между кинетикой сушки и физико-механическими свойствами древесины представим последнюю в виде некоторой полимерной композиции [10], строение которой подобно строению взаимопроникающих сеток, где углеводы образуют сетку за счет водородных связей и сил физического взаимодействия, но отличается тем, что сетки углеводов и лигнина соединены валентными связями. Тогда пространственная структура матрицы – это суперпозиция трех сеток [9], которые образуются водородными связями и силами физи-

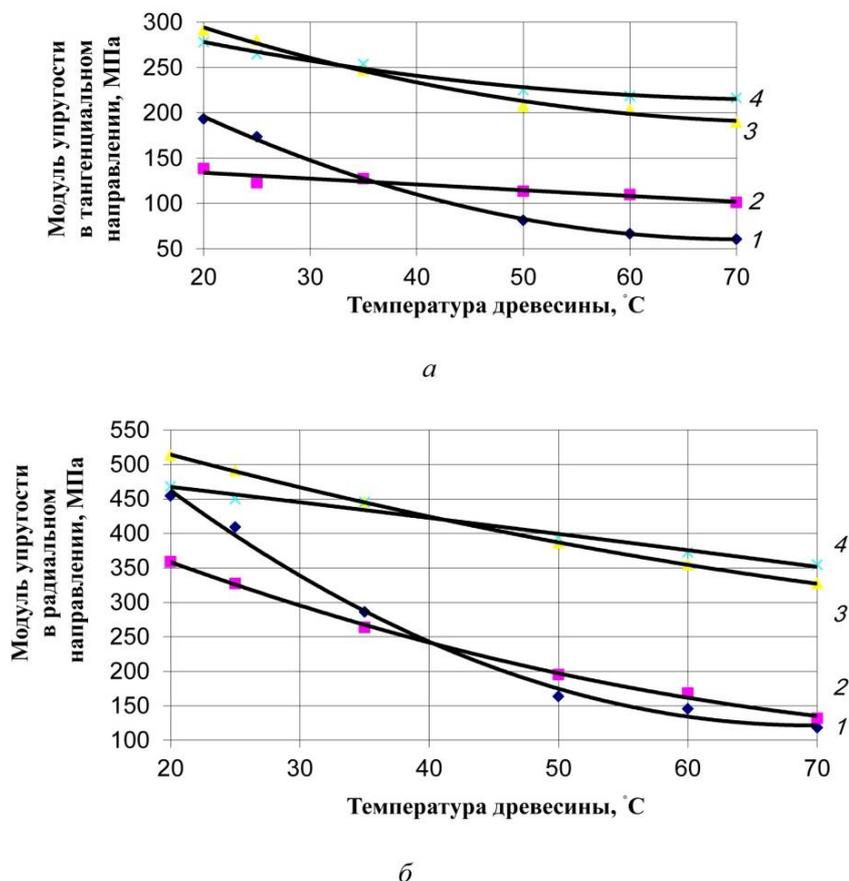


Рис. 4. Модуль упругости древесины лиственницы при растяжении в тангенциальном (*a*) и радиальном (*б*) направлениях при различной температуре нагрева древесины в зависимости от влажности древесины W_d и скорости нагружения v_d : 1 – $W_d \geq 30\%$; $v_d = 1$ кН/с; 2 – $W_d \geq 30\%$; $v_d = 0,1$ кН/с; 3 – $W_d \approx 5\%$; $v_d = 0,1$ кН/с; 4 – $W_d \approx 5\%$; $v_d = 1$ кН/с

ческого взаимодействия (Н-сетка); валентными связями между лигнином и нецеллюлозными углеводами (ЛУ-сетка); за счет структуры лигнина (Л-сетка).

Предложенная полимерная композиция позволяет объяснить цикличность разрушения древесины лиственницы при растяжении поперек волокон. Приведенные на рис. 5 графики (1, 2) «деформация–разрушение» указывают на то, что разрушение образца является многоциклическим процессом. Каждый цикл состоит из двух периодов. Цифры на графике указывают на реперные точки периодов цикла.

Вначале происходит пластическое деформирование при постоянном значении растягивающих сил (горизонтальный участок: 1–1_м; 2–2_м, ..., 13–13_м), что указывает на своеобразное «вытягивание» связей путем «разворачивания» клубка определенной группы макромолекул до некоторого предельного значения.

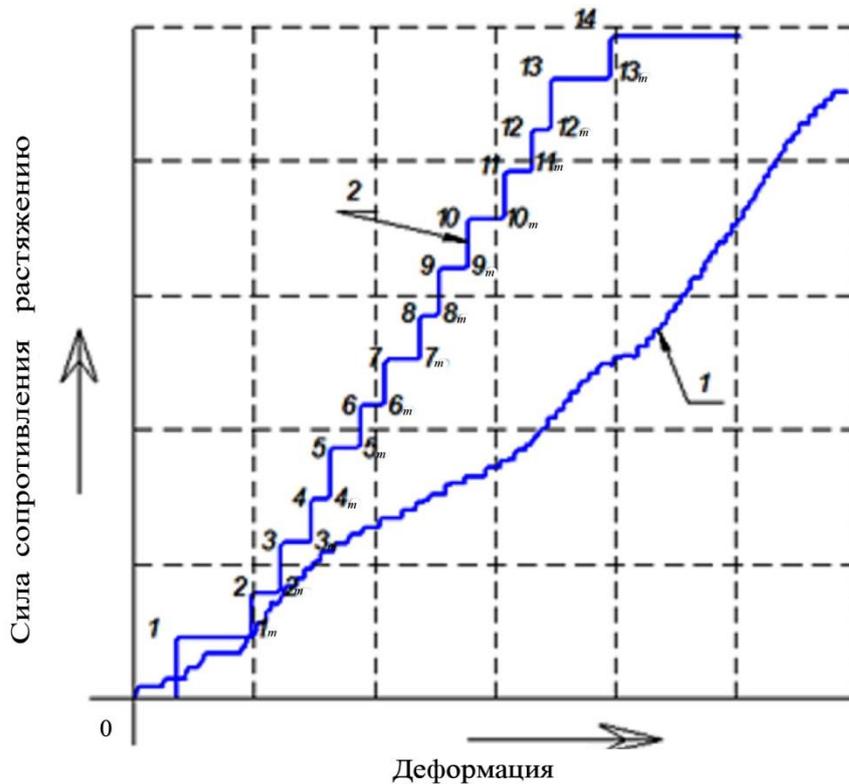


Рис. 5. Цикличность разрушения образцов древесины лиственницы при действии растягивающей силы в радиальном направлении ($W_d = 30\%$, $v_d = 0,1$ кН/с) и различной температуры нагрева древесины: 1 – 20 °C; 2 – 50 °C

По достижении предельного значения пластической деформации сетки растягивающая сила начинает воздействовать на узлы сетки (вертикальные отрезки: 1_m-2 , 2_m-3 , ..., 13_m-14), происходит натяжение связей без деформирования (упругое растяжение), что приводит к разрушению узла сетки. Следующий цикл растяжения соответствует сопротивлению более длинных по сравнению с предыдущими связями. Разрушение этих связей осуществляется по аналогичной схеме.

Суммарное относительное удлинение рабочей части испытуемого образца при растяжении как в радиальном, так и в тангенциальном направлении (независимо от температуры и влажности древесины, а также скорости нагружения) не превышает 1 %, что указывает на линейность связи между напряжениями растяжения σ_p и относительными деформациями ε . Такая зависимость характерна для упругих тел и подчиняется закону Гука [6]:

$$\sigma_p = E \varepsilon,$$

где E – модуль упругости.

Таким образом, одна из причин появления трещин в лиственничных пиломатериалах – ограниченная деформативность древесины. Поэтому необходимо изучить факторы, оказывающие влияние на образование трещин в начальный период сушки, когда древесина лиственницы при растяжении име-

ет минимальную жесткость – $E \cdot F$ (где F – площадь поперечного сечения конструкции) [1].

Для этого обратимся к результатам экспериментальных исследований (см. рис. 4). Основным вывод, который следует из анализа этого рисунка: модуль упругости древесины лиственницы при растяжении в радиальном направлении превышает аналогичный показатель в тангенциальном направлении в 1,67–2,50 раза независимо от физического состояния древесины.

Кроме того, полученные данные свидетельствуют, что прочность древесины лиственницы во многом определяется жесткостью такого элемента композиции, как сердцевинный луч. Объем сердцевинных лучей составляет порядка 10...11 % всего объема древесины [8]. Следовательно, располагаясь по радиусу ствола бревна, сердцевинные лучи обуславливают ее жесткость при растяжении поперек волокон.

Так, в досках, которые получены при реализации смешанной схемы распиловки бревен (см. рис. 3), наличие сердцевинных лучей существенно снижает прочность древесины лиственницы. Такой эффект (см. рис. 1, 2) объясняется более низкой жесткостью сердцевинных лучей в поперечном сечении тангенциальной зоны годовичного слоя по сравнению с клеточными стенками поздней древесины.

В радиальных пиломатериалах сердцевинные лучи выступают в качестве армирующих элементов, повышающих жесткость древесины лиственницы при растяжении. В результате выполняется основное условие сохранения целостности доски в начальный период сушки $[\sigma] \geq \sigma_p$ (где $[\sigma]$ – предел прочности) [14].

Две следующие группы факторов также зависят от особенностей структуры древесины лиственницы. Однако их влияние проявляется на определенных стадиях сушки через такой показатель, как распределение связанной влаги по сечению доски. При этом необходимо учитывать, что удаление влаги является одним из составляющих процесса экстракции [5]. Следовательно, процесс сушки древесины лиственницы сопровождается ее деструкцией [15], интенсивность которой во многом зависит от температуры материала.

Начальная стадия сушки характеризуется неравномерной усушкой поверхностных слоев доски, что является первопричиной возникновения растягивающих напряжений из-за наличия перепада влажности ΔW_r (см. таблицу).

В течение 16...23 ч сушки $\Delta W_r = 9,0...12,1$ %, что создает наиболее благоприятные условия для возникновения трещин в поверхностном слое доски и повышает вероятность выполнения условия $[\sigma] < \sigma_p$.

При равных значениях ΔW_r удельная усушка тангенциальной зоны поверхностного слоя доски превышает аналогичный показатель в радиальном направлении в 1,84–2,2 раза [7, 8]. В результате наблюдается повышение нереализованной усушки, являющейся основным фактором формирования значительных растягивающих напряжений. Повышенное значение нереализованной усушки в тангенциальной зоне поверхностного слоя доски фиксируется на фоне минимальной жесткости ($E \cdot F \rightarrow \min$) сердцевинного луча, что является вторым фактором. Поэтому тангенциальная зона поверхностного слоя лиственничной доски – это своеобразный концентратор напряжений. Таким образом, эта зона поверхности доски отличается высокой вероятностью образования трещин в начальный период сушки.

Распределение влажности в поверхностном слое доски

| Образец | Параметры сушки | | | |
|---------|----------------------|---|-------|---|
| | Продолжительность, ч | Влажность <i>i</i> -го слоя древесины по толщине доски, % | | Перепад влажности древесины между слоями образца ΔW_T , % |
| | | W_1 | W_2 | |
| 1 | 16 | 20,2 | 33,1 | 9,8 |
| | 40 | 12,0 | 16,6 | 4,6 |
| | 75 | 9,1 | 16,1 | 7,0 |
| | 99 | 5,3 | 8,1 | 2,8 |
| 2 | 18 | 14,6 | 23,5 | 8,9 |
| | 42 | 12,6 | 19,4 | 6,8 |
| | 66 | 8,3 | 14,3 | 6,0 |
| | 92 | 5,5 | 9,5 | 4,0 |
| 3 | 23 | 16,0 | 28,1 | 12,1 |
| | 46 | 19,3 | 31,8 | 10,7 |
| | 66 | 12,5 | 22,1 | 9,6 |
| | 92 | 7,4 | 10,1 | 2,7 |

Примечания: 1. $\Delta W_T = W_2 - W_1$. Если $W_2 > 30$ %, то W_2 принимается равной 30 %. 2. Глубина слоя 1 составляет 0...5 мм, слоя 2 – 5...10 мм.

В специальной литературе [2, 3, 6, 13 и др.] значительное внимание уделяется влиянию на образование трещин в полимере такого фактора, как скорость нагружения.

Как видно из представленных на рис. 4 графиков, скорость нагружения не изменяет структуру материала. Она устанавливает характер отклика системы на интенсивность действующих сил. Поэтому влияние скорости нагружения на жесткость древесины лиственницы следует рассматривать в совокупности с такими параметрами, как температура и влажность древесины [16].

Из полученных данных видно, что при температуре древесины 34...36 °С (тангенциальное растяжение) и 41 °С (радиальное растяжение) влияние скорости усыхания на жесткость древесины лиственницы ничтожно мало. Такая зависимость прослеживается независимо от влажности древесины. Следовательно, для предотвращения появления трещин в начальный период сушки лиственничных пиломатериалов смешанной распиловки температура первой ступени сушки должна составлять 34...36 °С, радиальной распиловки – 41 °С.

На заключительной стадии сушки наблюдается относительно равномерное распределение связанной влажности по сечению доски. В результате $\Delta W_T \rightarrow \min$ (см. таблицу). Как следствие, происходит формирование поперечного коробления. При сушке в зажатом состоянии поверхностные слои лиственничной доски испытывают дополнительные растягивающие напряжения ($\sigma_{\text{доп}}$) из-за недопущения коробления [4].

Рис. 6 иллюстрирует трещину в доске смешанной распиловки, которая сушилась в свободном состоянии, что привело к поперечному короблению. При этом $\sigma_{\text{доп}} \rightarrow 0$. В результате трещина, которая образовалась в начальный период сушки, ограничилась глубиной 10 мм. Проведенные опыты показали, что при сушке пиломатериалов в зажатом состоянии глубина трещины много выше того значения, которое указано на рис. 6, за счет действия дополнительных напряжений.



Рис. 6. Глубина распространения микротрещины в лиственничной доске при сушке в свободном состоянии

Выводы

1. Образование трещин при сушке лиственничных пиломатериалов – многофакторное явление, которое возникает в равной степени как в период повышенного перепада связанной влажности, так и в период ее выравнивания.

2. Древесина лиственницы характеризуется низкой деформативностью при растяжении поперек волокон, что позволяет относить ее к упругим телам.

3. Выделяются три группы факторов, влияющих на формирование трещин в лиственничных пиломатериалах. Основная группа связана непосредственно со структурой древесины лиственницы (с наличием концентратора напряжений в виде сердцевинных лучей), две другие связаны со структурой опосредованно и проявляются при определенном распределении связанной влаги по сечению доски.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
2. Аскадский А.А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
3. Бартнев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
4. Глухих В.Н. Повышение качества сушки пиломатериалов на основе учета анизотропии древесины при составлении схем раскряя бревен: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2008. 291 с.
5. Зарипов Ш.Г. Совершенствование технологии сушки лиственничных пиломатериалов: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2016. 243 с.
6. Кауш Г. Разрушение полимеров / пер. с англ.; под ред. С.Б. Ратнера. М.: Мир, 1981. 440 с.
7. Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке М.: Лесн. пром-сть, 1971. 176 с.
8. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 384 с.

9. Цините В.А., Гравитис Я.А., Эриньш П.П., Ребятникова А.Ф. Влияние удаления лигнина на набухание и механические свойства древесины // Химия древесины. 1976. № 1. С. 12–20.
10. Эриньш П.П., Цините В.А., Витоле И.М. Взаимосвязь между изменениями в химическом составе, субмикроскопической структуре и механических свойствах березовой древесины при обработке растворами щелочей и кислот в мягких условиях // РЖХим. 1972. С. 21–28.
11. Hardtke H.-J., Militzer K.-E., Fischer R., Hufenbach W. Entwicklung und Identifikation eines kontinuumsmechanischen Modells für die numerische Simulation der Trocknung von Schnittholz // Research report DFG-project Ha 2075/3-2. Dresden, 1997.
12. Milota M.R. Warp and Shrinkage of Hem-Fir Stud Lumber Dried at Conventional and High Temperatures // Forest Products Journal. 2000. No. 50(11). Pp. 79–84.
13. Mindess S., Bentur A. Crack Propagation in Notched Wood Specimens with Different Grain Orientations // Wood Science and Technology. 1986. Vol. 20, iss. 2. Pp. 145–155.
14. Niemz P. Holz. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993. 243 p.
15. Oltean L., Teischinger A., Hansmann C. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood during Wood Drying – a Review // BioResources. 2007. Vol. 2, no. 4. Pp. 789–811.
16. Stamm A.J. Thermal Degradation of Wood and Cellulose // Industrial & Engineering Chemistry. 1956. Vol. 48, iss. 3. Pp. 413–417.

Поступила 23.12.17

UDC 674.047

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying

Sh. G. Zaripov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor

Branch of Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Region, 662543, Russian Federation; e-mail: zaripov_sh@mail.ru

Cracks of various types are the most common drying defects in larch lumber. Numerous studies have shown that this type of defects depends on many factors. Therefore, the systematization of these factors will allow establishing their level of significance. The studies have also demonstrated that the main factors influencing the formation of cracks in larch lumber during drying can be divided into three groups, which to some extent depend on the wood structure. The first (main) group is associated with the presence of a significant number of woodrays in larch wood. In mixed sawn timber, they act as stress concentrators, which leads to cracks appearance during drying. Woodrays strengthen the board design in radially sawn timber. As a result, the possibility of cracks in this group of lumber decreases manyfold. The effect of the second and third groups of factors is due to the distribution of bound moisture over a cross section of the board. The goal of research is to systematize the factors that will help to construct the technological process of larch lumber drying in such a way as to minimize the likelihood of cracks appearance.

Keywords: crack, larch lumber, hardness, woodray, distribution of bound moisture.

For citation: Zaripov Sh.G. Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 3, pp. 127–136. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127

REFERENCES

1. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 560 p. (In Russ.)
2. Askadskiy A.A. *Deformatsiya polimerov* [Deformation of Polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 448 p. (In Russ.)
3. Bartenev G.M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and Mechanism of Polymer Destruction]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 280 p. (In Russ.)
4. Glukhikh V.N. *Povyshenie kachestva sushki pilomaterialov na osnove ucheta anizotropii drevesiny pri sostavlenii skhem raskroya breven: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving the Quality of Drying of Sawn Timber on the Basis of Wood Anisotropy Accounting when Drawing Log Cutting: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Saint Petersburg, 2008. 291 p.
5. Zaripov Sh.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii sushki listvennichnykh pilomaterialov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving the Drying Schedule of Larch Lumber: Dr. Eng. Sci. Diss.]. Arhanglsk, 2016. 243 p.
6. Kaush H.H. *Polymer Fracture*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1978. 332 p. DOI: 10.1007/978-3-642-96460-2
7. Ugolev B. N. *Deformativnost' drevesiny i napryazheniya pri sushke* [Wood Deformity and Tension when Drying]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 176 p. (In Russ.)
8. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood Science with the Basics of Forest Commodity Science]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 384 p. (In Russ.)
9. Tsinite V.A., Gravitis Ya.A., Erin'sh P.P., Rebyatnikova A.F. Vliyanie udaleniya lignina na nabukhanie i mekhanicheskie svoystva drevesiny [Influence of Lignin Removal on Swelling and Mechanical Properties of Wood]. *Khimiya drevesiny*, 1976, no. 1, pp. 12–20.
10. Erin'sh P.P., Tsinite V.A., Vitole I.M. Vzaimosvyaz' mezhdru izmeneniyami v khimicheskom sostave, submikroskopicheskoy strukture i mekhanicheskikh svoystvakh berezovoy drevesiny pri obrabotke rastvorami shchelochey i kislot v myagkikh usloviyakh [Interrelation between Changes in the Chemical Composition, Submicroscopic Structure and Mechanical Properties of Birch Wood at Alkali and Acid Solutions Treatment under Mild Conditions]. *Referativnyy zhurnal Khimiya*, 1972, pp. 21–28. (In Russ.)
11. Hardtke H.-J., Militzer K.-E., Fischer R., Hufenbach W. Entwicklung und Identifikation eines kontinuumsmechanischen Modells fur die numerische Simulation der Trocknung von Schnittholz. *Research report DFG-project Ha 2075/3-2*. Dresden, 1997.
12. Milota M.R. Warp and Shrinkage of Hem-Fir Stud Lumber Dried at Conventional and High Temperatures. *Forest Products Journal*, 2000, no. 50(11), pp. 79–84.
13. Mindess S., Bentur A. Crack Propagation in Notched Wood Specimens with Different Grain Orientations. *Wood Science and Technology*, 1986, vol. 20, iss. 2, pp. 145–155.
14. Niemez P. *Holz. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag, 1993. 243 p.
15. Oltean L., Teischinger A., Hansmann C. Influence of Temperature on Cracking and Mechanical Properties of Wood during Wood Drying – a Review. *BioResources*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 789–811.
16. Stamm A.J. Thermal Degradation of Wood and Cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1956, vol. 48, iss. 3, pp. 413–417.

Received on December 23, 2017