

## ИЗМЕНЕНИЯ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ УПЛОТНЕННОЙ СЖАТИЕМ ПОПЕРЕК ВОЛОКОН

*Владимир Александрович Шамаев, Геннадий Константинович Гаврилов,  
Владимир Семенович Болдырев*

Воронежский ордена дружбы народов лесотехнический институт

Испытано влияние параметров процесса уплотнения древесины на её деформативность и определено оптимальные технологические условия прессования, при которых нарушение структуры древесины является минимальным

Согласно имеющимся наблюдениям, материал при каждом повторном нагружении деформируется иначе, что отражено в известном принципе Вольтерра [8, 10]. Это в полной мере относится и к сопоставлению свойств натуральной и прессованной древесины всех модификаций [6]. Действительно, производство прессованной древесины уже одним своим названием предусматривает исходное деформирование, примерно на 50% [1]. Такое значительное начальное деформирование выявляет даже самые незначительные составляющие. Наименее изученными из них являются деформации, развивающиеся за счет разрыва связей, которые условимся называть деформациями разрушения.

Необходимость учета элементов разрушения при расчете деформативного поведения материалов по реологической модели отмечалась различными исследователями [2, 5, 8]. При этом предлагались как ограниченные элементы сухого трения, так и принципиально новые построения [7]. Такие модели позволяют проводить прогнозирование как механизма разового нагружения, так и деформативность материала во времени, с вычислением показателей долговременного сопротивления [3, 4].

Закономерности возникновения и развития внутренних микротрещин, определяющих необратимые деформации разрушения, базируются на условиях состояния материала и величине общей деформации. Немаловажным представляется и временной фактор: скорость деформирования и время нахождения под нагрузкой [4, 5]. Это крайне затрудняет непосредственное сопоставление материалов. Поэтому приходится сравнивать материал исходный с редуцированным, то есть претерпевшим известную деформацию и возвращенным возможно полно в исходное состояние. Исследования, проведенные при сжатии в радиальном направлении древесины, позволили установить, что, например, прочность вдвое запрессованной древесины после распрессовки сни-

жается на 20 - 30% от исходной [2]. Было установлено, что разрывается или отслаивается от срединной пластинки вторичная оболочка клеточной стенки, выполняющая функции силового элемента. Однако аналогичное нарушение наблюдалось и при сушке древесины — необходимом элементе производства прессованной древесины и её формостабилизации [5, 10].

Сложный механизм распределения усилий в нагруженном образце вызывает появление узлов сопротивлений и концентраторов напряжений внутри образца. Такие узлы в первую очередь испытывают воздействие нагрузки и первыми разрушаются под её воздействием. Поэтому деструкция 20 - 30% таких узлов не может не отразиться на показателях различных физико-механических свойств древесины. Это позволяет использовать в качестве показателя изменения различных функций отклика, например, модуля упругости или показателя твердости, замер которых можно вести с минимальными нарушениями или даже адеструктивно.

Для этих показателей эмпирически установлена зависимость от времени, влажности и температуры. В первом приближении может быть использована формула:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = 1,54 \frac{447 - T}{W \cdot 2^{\tau/5}} \quad (1)$$

где 1,54 МПа/град — температурный градиент жесткости;  $T$  — температура по Кельвину;  $\sigma$  — напряжение, МПа;  $\varepsilon$  — деформация, безразмерна;  $\tau$  — время;  $2^{\tau/5}$  — функция времени, здесь безразмерна;  $W$  — влажность, в %.

Идеальным можно было бы считать уплотнение материала, проходящего стадии разупрочнения и последующего упрочнения, при котором вся прикладываемая на древесину нагрузка поглощалась бы ею без разрушения. Теоретическое обоснование такого деформирования в настоящее время не разработано. В реальном же процессе уплотнения всегда присутствует составляющая разрушения, составляющая по данным [6] до 30% от приращения прочности древесины. Вполне логично предположить, что придав древесине пластичность и деформируя её при малых нагрузках с небольшой скоростью, составляющую разрушения можно свести к минимуму. Критерием эффективности уплотнения может служить приведенная прочность уплотненной древесины. Следует отметить, что применяющийся в настоящее время для характеристики эффективности процесса модификации коэффициент качества [10] является некорректным, так как при этом сравниваются приведенные прочности натуральной и модифицированной древесины при различной влажности. Влажность натуральной древесины берется 12 или 15% а модифицированной 4 - 6% в то время как изменение влажности на 1% изменяет прочность на 7 - 8%. Поэтому, если мы приведем показатели прочности натуральной древесины и модифицированной к одной влажности, то коэффициент качества всегда будет меньше 1. Для предела прочности при сжатии вдоль волокон сказанное иллюстрируется рис. 1. Значения предела прочности для натуральной древесины разных пород и разной плотности взяты из литературных дан-

ных [9] и пересчитаны для влажности 5%, так же, как и для модифицированной древесины. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, показывает, что уплотнение до плотности выше 1200 кг/м<sup>3</sup> ведет к непропорциональному росту предела прочности, что связано с увеличением микроразрушений.

Следует отметить что при одной и той же конечной плотности предел прочности зависит от начальной плотности древесины: чем ниже начальная плотность, тем ниже предел прочности. Это связано с тем, что для уплотнения древесины с малой начальной плотностью порядка 400 - 500 кг/м<sup>3</sup> требуется большая степень уплотнения 60 - 65% при этом деформации разрушения проявляются больше, чем при уплотнении на 30 - 35%. Поэтому древесину низкой плотности целесообразно уплотнять до плотности не выше 1000 кг/м<sup>3</sup>, ограничивая степень уплотнения 50 - 55%.

Для качественной оценки степени разрушения древесины при сжатии можно пользоваться приведенным пределом прочности прессованной древесины и коэффициентом качества. Возможно также использование неразрушающих методов контроля на дефектоскопах, например, по продольным импульсным ультразвуковым волнам (ПИУВ) на дефектоскопе ДУК-20. Однако для количественной оценки этот критерий не подходит, так как является косвенным и не поддается прямому определению.

Нами разработана методика количественной оценки степени разрушенности древесины в результате сжатия. Для этого сравнивают образцы древе-

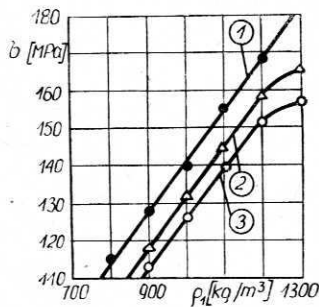


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии вдоль волокон от плотности  
1 — натуральной древесины различных пород, 2 — DESTAM, 3 — лигнамона

Fig. 1. Dependence of compression strength  $\sigma$  along fibres upon density  $\rho$ :  
1 — natural wood of different species, 2 — DESTAM densified wood, 3 — LIGNAMON densified wood

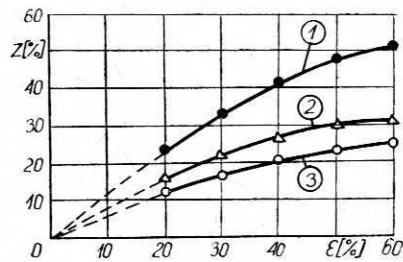


Рис. 2. Зависимость деформации древесины плотностью 610 кг/м<sup>3</sup> от степени прессования  
1 — в аксиальном направлении, 2 — в радиальном направлении, 3 — в тангенциальном направлении

Fig. 2. Dependence of deformation index Z on the compression extent  $\epsilon$  in birch wood with 610 kg/m<sup>3</sup> initial density  
1 — in axial direction, 2 — in radial direction, 3 — in tangential direction

сины до и после сжатия, приведенные к одному и тому же состоянию по плотности, влажности и другим параметрам. Критерием оценки берется статическая твердость в различных направлениях. Степень нарушения структуры

(или деформация разрушения) определяется по формуле:

$$Z_{(R, T, A)} = \frac{H_{(R, T, A)}^0 - H_{(R, T, A)}^1}{H_{(R, T, A)}^0} \quad (2)$$

где  $Z_{(R, T, A)}$  — степень нарушения структуры древесины в направлениях: радиальном, тангенциальном, аксиальном;  $H_{(R, T, A)}^0$ ,  $H_{(R, T, A)}^1$  — твердость древесины до и после сжатия в направлениях: радиальном, тангенциальном и аксиальном.

Представляло интерес оценить влияние основных технологических факторов получения уплотненной древесины на деформацию разрушения. В таблице 1 представлены значения исследуемых первичных факторов и их параметры.

Проверялось также влияние пропаривания перед прессованием и сжатия в тангенциальном направлении на деформацию разрушения. Для экспериментов использовались образцы из древесины березы размерами  $20 \times 20 \times 30$  мм (последний размер вдоль волокон) плотностью  $600 - 700 \text{ кг/м}^3$ . Прессование образцов проводилось в специальной прессформе, исключающей поперечную деформацию образцов. Сжатие образцов проводилось в радиальном направлении, степень прессования (кроме опыта № 1) — 50%. Влажность

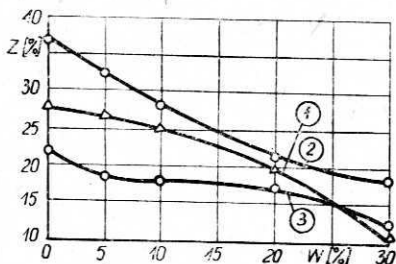


Рис. 3. Зависимость деформации древесины плотностью  $629 \text{ кг/м}^3$ , от влажности

1 — в аксиальном направлении, 2 — в радиальном направлении, 3 — в тангенциальном направлении

Fig. 3. Dependence of deformation index  $Z$  upon the moisture content  $W$  in birch wood with  $629 \text{ kg/m}^3$  initial density:

1 — in axial direction, 2 — in radial direction, 3 — in tangential direction

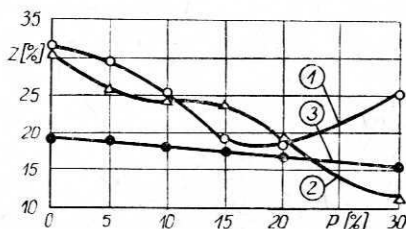


Рис. 4. Зависимость деформации древесины плотностью  $657 \text{ кг/м}^3$  от содержания пластификатора

1 — в аксиальном направлении, 2 — в радиальном направлении, 3 — в тангенциальном направлении

Fig. 4. Dependence of deformation index  $Z$  upon the plasticizer content  $P$  in birchwood with  $657 \text{ kg/m}^3$  initial density:

1 — in axial direction, 2 — in radial direction, 3 — in tangential direction

образцов в момент испытаний (кроме опыта № 2) — 10%. Прессование производилось на испытательной машине ИДМУ-30. Скорость прессования (кроме опыта № 4) составляла  $20 \text{ мм/мин}$ . После сжатия образцы извлекались из прессформы и помещались в автоклав, где пропаривались при давлении  $1,5 \text{ ати}$  в течение  $15 \text{ мин}$ . В результате пропарки образцы полностью распрессовывались. После этого в течение 1 месяца образцы кондиционировались таким образом, чтобы их плотность и геометрические размеры соответствовали

исходным. Твердость до и после сжатия определялась в трех направлениях симметрии на твердомере по ГОСТ СССР 13338-80.

После определения твердости образцы испытывались на сжатие вдоль волокон по ГОСТ СССР 9629-81. Количество образцов на каждую точку 8, количество определений твердости в одном направлении 3. Таким образом, каждая точка опыта определялась как среднее арифметическое 24 значений с доверительной вероятностью 0,680 и показателем точности менее 5%. В качестве пластификатора древесины использовалась мочевины. Содержание её определялось в процентах к массе абсолютно сухой древесины.

На рис. 2 приведена зависимость деформации разрушения от степени прессования. Как и следовало ожидать,  $Z$  резко возрастает с увеличением  $\varepsilon$ . Наибольшее падение твердости наблюдается для аксиального направления, что объясняется разрушениями трубчатой системы клеточных пор и изменениями их конфигурации. Значительные разрушения имеют место в радиальном направлении, так как в этом направлении происходит расплющивание клеток при сжатии. В среднем при увеличении степени прессования с 20% до 60% деформация разрушения возрастает в 2 раза. Если для аксиального направления зависимость  $Z$  от  $\varepsilon$  близка к прямой, то для тангенциального и радиального направлений она носит затухающий характер после  $\varepsilon=40\%$ .

Весьма значительное влияние на деформацию разрушения оказывает влажность древесины (рис. 3). С увеличением влажности с 0 до 30%  $Z$  падает с 30-40% до 12-17% для радиального и аксиального направлений. Для танген-

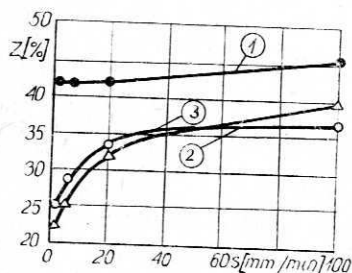


Рис. 5. Зависимость деформации древесины плотностью  $679 \text{ kg/m}^3$  от скорости прессования

1 — в аксиальном направлении, 2 — в радиальном направлении, 3 — в тангенциальном направлении

Fig. 5. Dependence of deformation index  $Z$  upon the compression speed  $C$  in birchwood with  $679 \text{ kg/m}^3$  initial density:

1 — in axial direction, 2 — in radial direction, 3 — in tangential direction

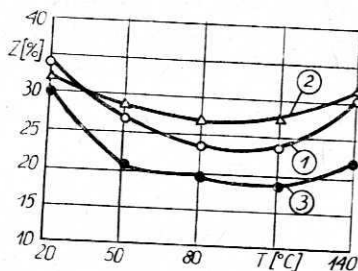


Рис. 6. Зависимость деформации древесины плотностью  $716 \text{ kg/m}^3$  от температуры прессования

1 — в аксиальном направлении, 2 — в радиальном направлении, 3 — в тангенциальном направлении

Fig. 6. Dependence of deformation index  $Z$  upon the temperature  $T$  at pressing birchwood with  $716 \text{ kg/m}^3$  initial density

1 — in axial direction, 2 — in radial direction, 3 — in tangential direction

циального направления зависимость  $Z$  от  $W$  проявляется слабее. Как и в предыдущем случае, в тангенциальном направлении деформация разрушения значительно меньше, чем в других направлениях, поскольку клетки древесины

при сжатии деформируются в наименьшей степени именно в тангенциальном направлении. С учетом этого в дальнейшем изменения  $Z$  в тангенциальном направлении мы анализировать не будем.

Как видно из рис. 2, значения  $Z$  для влажности 25% различаются незначительно. Наибольшее изменение деформации разрушения находится в интервале влажности 15 - 25%. Следовательно, оптимальная влажность при сжатии с  $Z \rightarrow \min$  будет 25 - 30% со значениями  $Z_A$  и  $Z_R$  соответственно 11,5% и 17,6%.

На рис. 4 приведена зависимость  $Z$  от количества пластификатора (мочевина). Для  $Z$  в радиальном направлении увеличение содержания мочевины до 15% вызывает незначительное уменьшение деформации разрушения, затем  $Z_R$  резко падает в интервале с 15 - 20% и далее уменьшается не так резко. Это связано с тем, что при содержании мочевины до 20% она вся располагается в стенках клеток; при дальнейшем насыщении древесины мочевиной последняя отлагается уже в полостях клеток, мало влияя на пластичность древесины в направлении сжатия. При малом содержании мочевины (до 15%) она как гидрофильный агент, по-видимому, концентрируется в наружных слоях клеточных стенок и поэтому  $Z$  в направлении сжатия высока.

Для аксиального направления влияние пластификатора на деформацию разрушения проявляется уже с 10%-ного содержания мочевины, а при содержании мочевины свыше 20%  $Z$  начинает возрастать, так как свободная мочевина в полостях клеток при сжатии вызывает разрушения в клеточных стенках древесины. Поэтому оптимальное содержание мочевины для условия  $Z \rightarrow \min$  будет 20%, в этом случае значения  $Z_R$ ,  $Z_T$ ,  $Z_A$  будут составлять 16,5 - 18,5%.

Влияние скорости прессования на деформацию разрушения наиболее проявляется для радиального и тангенциального направлений (рис. 5). Как показал эксперимент свыше 20 мм/мин скорость прессования мало влияет на  $Z$ . Анализ зависимости  $Z$  от скорости прессования показывает, что для получения ми-

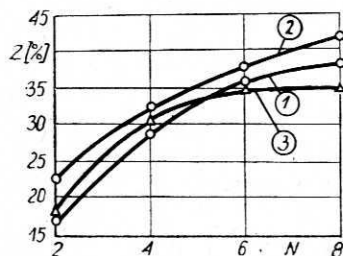


Рис. 7. Зависимость деформации древесины плотностью 583 кг/м<sup>3</sup> от количества циклов сжатия

1 — в аксиальном направлении, 2 — в радиальном направлении, 3 — в тангенциальном направлении

Fig. 7. Dependence of deformation index  $Z$  upon the number  $N$  of compression load cycles in birchwood with 583 kg/m<sup>3</sup> initial density

1 — in axial direction, 2 — in radial direction, 3 — in tangential direction

нимальной деформации разрушения следует максимально ограничивать скорость сжатия, иначе древесина не успевает релаксировать в условиях непрерывного возрастания нагрузки и в ней накапливаются внутренние напряжения, вызывающие появление микро- и макротрещин. Для условия  $Z \rightarrow \min$  оптимальной следует считать скорость 0,2 мм/мин, которая имеет место в случае совмещенного способа получения дестама [11].

На рис. 6 показано изменение деформации разрушения в зависимости от температуры прессования. Анализ приведенных зависимостей позволяет заключить, что температура оказывает на  $Z$  влияние не столь значительно, как влияние ранее рассмотренных факторов. Наименьшая деформация разрушения приходится на температуру 100 - 110°C. При повышении температуры до 140°C  $Z$  возрастает, так как древесина становится неустойчивой и межволоконные связи ослабляются. Минимальные значения  $Z_A$  и  $Z_R$  составляют соответственно 23% и 27,5%.

При увеличении количества сжатий до двух и более раз деформация разрушения резко возрастает (рис. 7) и лишь после 6 циклов это влияние затухает.

Анализируя зависимости, представленные на рис. 1 - 7, можно вывести оптимальные технологические параметры прессования древесины, при которых деформация разрушения минимальна. Эти параметры имеют следующие значения:

1. Влажность — 30%;
2. Количество пластификатора (мочевина) — 20%;
3. Скорость прессования — 0,2 мм/мин;
4. Температура прессования — 100°C.

Проведение экспериментальной проверки по оптимизированным параметрам при степени прессования 50% показало, что в этом случае деформация разрушения в радиальном направлении составляет 5,5%, в тангенциальном — 3,5, в аксиальном — 10%.

Praca wpłynęła do Redakcji  
w kwietniu 1985 r.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арима Т.: Влияние температуры и усилий прессования на деформацию древесины. Журнал РИ ЦНИИГЭИ, № 13, Москва, 1968.
2. Енчев Е. А.: Строение и реологические свойства древесины. Дер. обр. и меб. пром., София, 12, № 10, 1962.
3. Иванов Ю. М.: Разрушение древесины при повторных напряжениях за пределом пластического течения. ДАН, т. 73, т. 5, 1950, с. 175.
4. Иванов Ю. М.: Температурно-временная закономерность прочности древесины. Лесной журнал, № 5, 1982, с. 75.
5. Лавничак М. Я.: Релаксация напряжений в древесине и древесных материалах. Журнал РИ ЦНИИГЭИ, № 13, Москва, 1968, с. 312.
6. Москалева В. Е.: Строение древесины и его изменения при физических и механических воздействиях. АН СССР, Москва, 1957, с. 99.
7. Регель В. Р.: Механические модели полимеров, включающие элементы разрушения. Журнал ВМС, т. 6, № 3, 1964, с. 396.
8. Уголев Б. Н.: Деформативность древесины и напряжения при сушке. Лесная промышленность, 1971, с. 10 - 17.
9. Уголев Б. Н.: Древесиноведение с основами лесного товароведения. Лесная промышленность, 1975, с. 83.
10. Хухрянский П. Н.: Прессование древесины. Лесная промышленность, 1964, с. 171.
11. Шамаев В. А., Гребенщиков А. В.: Получение дестам совмещенным способом В кн. „Современные проблемы древесиноведения”, Воронеж, 1981, с. 280 - 282.

## ZMIANY ODKSZTAŁCALNOŚCI DREWNA ZAGĘSZCZONEGO WSKUTEK ŚCISKANIA W POPRZEK WŁÓKIEN

### Streszczenie

Celem przedstawionych badań było określenie głównych czynników technologicznych, wpływających na mikrodestrukcję drewna, jaka zachodzi podczas prasowania drewna zagęszczanego. Wyniki wstępnej analizy pozwoliły badane uboczne efekty prasowania drewna wyrazić za pomocą wskaźnika względnej deformacji  $Z$ . Wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 1 - 7, określając zależność wskaźnika  $Z$  od zasadniczych technologicznych parametrów prasowania zagęszczającego drewno brzozone w kierunku promieniowym. Przy optymalnych wartościach 30% wilgotności drewna, 20% zawartości plastyfikatora (mocznika), prędkości zagęszczania 0,2 mm/min i temperaturze prasowania 100°C, najniższy stopień mikrodestrukcji – rzędu 3,5 do 10% – można osiągnąć przy prasowaniu drewna do 50% jego pierwotnej grubości.

## CHANGES IN WOOD DEFORMABILITY BY DENSIFYING COMPRESSION ACROSS FIBRES

### Summary

The aim of the presented investigation was to disclose the main technological factors influencing the microdestruction of wood, which does occur in train of plastic densifying of wood. Results of the initial analysis allowed to represent the investigated by-effects of a transverse compression of wood with an index  $Z$  of its relative deformation. Experimental investigations have yielded results, graphically presented in Fig. 1 - 7, disclosing the dependence of the  $Z$ -index on the main technological parameters of densifying birchwood with radial compression. With the optimum numerical values of 30% moisture content, 20% plasticizer (urea) content, 0,2 mm/min. compression speed and 100°C pressing temperature a minimum microdestruction index – ranging from 3,5 upto 10% – may be achieved in birchwood compressed to 50% of its initial thickness.