УДК 674.001

Л.Т. СВИРИДОВ, О.Р. ДОРНЯК
Воронежская государственная лесотехническая академия

РЕОЛОГИЯ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОЦЕССАХ ЕЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ

В рамках механики гетерофазных систем предложена математическая модель процесса деформирования древесины, учитывающая влияние на изменение ее пористой структуры сложных реологических свойств и поверхностных явлений в тонких прослойках воды. С использованием численных методов исследовано влияние полей влажности и температуры образца на прочность и качество получаемого материала.

Mathematical model for studying of deforming process of wood taking into account the influence its rheological properties and surface phenomena in thin interlayers of water on a modification of the porous structure is made. The model is constructed on the basis of continual approach within mechanics of heterogeneous medium. The influence of moisture and temperature fields in a sample on strength and quality of an obtained material with using of the numerical methods is studied.

Большинство технических способов улучшения механических свойств натуральной древесины предусматривают ряд технологических операций, связанных с прогревом, пропиткой, сушкой и прессованием образцов [9]. Теоретическое изучение технологий модифицирования древесины – весьма сложная задача, особенно в том случае, если стремятся описать широкий комплекс взаимосвязанных теплофизических и механических явлений, а также учесть особенности капиллярно-пористого строения древесины. При моделировании процессов прессования и гидротермической обработки в реальных условиях необходимо прогнозировать эволюцию распределения по объему образца главной в этих процессах характеристики – пористости, а также полей влажности, температуры, деформаций и напряжений. Для этих целей нужна строгая теория, устанавливающая функциональные зависимости между содержанием влаги и напряжением в любой точке материала [7]. Данная работа посвящена построению такой теории.

Математическое моделирование процесса деформирования древесины проведено в рамках механики геторогенных сред [6]. Отметим, что к исследованию процессов модифицирования древесины такой подход ранее не применялся. Мы рассматриваем древесину как трехфазную систему, содержащую твердую фазу (древесинное вещество), жидкость и парогазовую смесь. Метод усреднения по отдельным фазам позволяет учесть влияние поверхностных сил в тонких капиллярах клеточных стенок древесины на изменение структурных параметров пористой системы.

Для описания реологического поведения древесины используется реологическое уравнение, предложенное в работе [5] как обобщение реологической модели среды с двойной пористостью [2]. Особенность этого уравнения в том, что, наряду с параметрами вязкоупругого поведения структурного каркаса древесины и материала клеточных стенок, оно явным образом содержит характеристики структуры древесины: объемное содержание крупных пор, капилляров, воды, древесинного вещества. Тензор макродеформаций твердой фазы, определяемый градиентами средних смещений материала,

$$\varepsilon^{ij} = \Pi_s^{ijkl}(0)\left[\Xi_s^{ij} + \int_0^t K_s^{ijkl}(t-\tau)\Xi_s^{ij}d\tau\right] +$$

$$+\Pi_f^{ijkl}(0)\left[\Xi_f^{ij}+\int_0^t K_f^{ijkl}(t-\tau)\Xi_f^{ij}d\tau\right]+\Lambda_s^{ij}\Theta_3;$$

$$\Xi_s^{ij}=\frac{\sigma^{kl}+\alpha_2 p_2\delta^{kl}+\alpha_1 p_1\delta^{kl}}{\alpha_3};$$

$$\Xi_f^{ij}=\frac{\sigma^{kl}}{1-m_{\text{п}}}+\beta_2 p_2\delta^{kl}+\beta_1 p_1\delta^{kl};$$

$$\beta_1=\frac{m_{\text{п}}\alpha_{\text{п}1}}{1-m_{\text{п}}}+\alpha_{k1};\quad \beta_2=\frac{m_{\text{п}}\alpha_{\text{п}2}}{1-m_{\text{п}}}+\alpha_{k2};$$

$$\alpha_{\text{п}1}+\alpha_{\text{п}2}=1;\quad \alpha_{k1}+\alpha_{k2}=1,$$

где K^{ijkl} – тензор функций скорости ползучести; Λ^{kl} – тензор коэффициентов температурного расширения, K^{-1}; $\Pi^{ijkl}(0)$ – тензор мгновенных податливостей, Па^{-1}; p – давление, Па; t – время, с; Θ − разность между текущей температурой и некоторым ее начальным значением, K; m_n – пористость, определяемая отношением объема макропор к объему материала; α_{ki} и α_{ni} – объемное содержание i-й фазы в объеме капилляров ($i = 1$) и пор ($i = 2$) соответственно. Верхние индексы i, j, k, l используются для обозначения компонентов тензоров, нижние индексы относятся к структурному каркасу древесины (f), к материалу древесного скелета (s), к системе макропор (n), к системе капилляров (k).

Физические свойства воды, содержащейся в древесине, не одинаковы, поскольку вода в древесине имеется не только в свободном, но и в связанном состоянии, характеризующимся измененной молекулярной структурой вблизи твердых поверхностей [4]. Усредненное по объему жидкой фазы давление p_2 зависит от объемного содержания и давления свободной воды и связанной воды в смачивающих пленках и тонких порах. Связанная вода в тонких прослойках создает расклинивающее давление, которое вносит основной вклад в величину p_2. Расклинивающее давление тонких прослоек можно представить как сумму $p_2 = p_{\kappa 2} = P + \Delta p(\alpha_2, I_\sigma, T)$, где P – равновесное расклинивающее давление в тонких прослойках воды, определяемое либо с помощью изотерм, либо с использованием теоретических подходов; Δp_2 – неравновесная составляющая расклинивающего давления, зависящая от интенсивности нагружения пористого материала [3].

Параметры реологической модели, а также составляющие расклинивающего давления применительно к древесине сосны были получены путем обработки кривых ползучести при сжатии в главных направлениях анизотропии при различных температурах [9], а также экспериментальных данных по набуханию и усушке [8]. Ядра ползучести представлялись в виде экспонент: $K_n^{ijkl}(t) = d_n^{ijkl}\,\text{e}^{-t/\lambda_n^{ijkl}}$; $n = s, f$.

Процесс уплотнения древесины происходил в специальной пресс-форме с жесткими стенками [9]. В случае прессования поперек волокон пресс-форма имеет открытые торцевые поверхности. Деформации вдоль волокон пренебрежимо малы. Предположим, что размер длинной стороны образца во много раз превосходит его поперечные размеры и что распределение нагрузки в зоне контакта пресса с образцом вдоль длинной оси практически равномерно. Это дает возможность считать, что реализовано состояние плоской деформации. Деформированию обычно подвергалась нагретая древесина. Температурное поле в объеме заготовки в общем случае неоднородно. Температура частиц среды принята неизменной, что корректно, так как характерное время теплопереноса в твердой и в жидкой фазах древесины существенно больше времени процесса прессования.

Двумерная краевая задача для исследования напряженно-деформированного состояния образца в процессе прессования включает уравнения равновесия, сохранения массы твердой фазы (в пренебрежении силами сопротивления фильтрационному переносу), соотношения Коши, реологическое уравнение. Силы трения между формирующимся композитом и стенками пресс-формы, а также пуансоном не учитываются. Условие контактного взаимодействия верхней грани образца с нижней поверхностью

жесткого пуансона представляет собой равенство нормальных компонентов вектора перемещений по всей поверхности контакта. Нормальные напряжения в зоне контакта при интегрировании дают результирующую силу прессования.

Поставленная краевая задача является нелинейной даже для материалов с однородным распределением влажности и пористости, поскольку заранее неизвестно положение нижней грани пуансона в каждый момент времени и уровень напряжений зависит от объемного содержания фаз. Для проведения вычислительного эксперимента с целью изучения напряженно-деформированного состояния в древесном образце с изменяющейся пористой структурой построены конечно-разностные уравнения и разработан итерационный алгоритм их реализации.

Важным элементом анализа процесса деформирования древесной заготовки является оценка ее прочности. В качестве критерия прочности древесины выбран полиномиальный критерий 4-й степени, предложенный Е.К.Ашкенази [1]. При различных видах испытаний учтено влияние на пределы прочности температуры, влажности и степени прессования.

Предложенная математическая модель процесса прессования древесины учитывает влияние реологического фактора и эффекта расклинивающего давления в тонких прослойках воды на изменение пористой структуры материала при его уплотнении. Численные расчеты позволяют прогнозировать степень прессования и изменение пористой структуры по сечению образца. Определение поля тензора напряжений позволяет воспользоваться критериями прочности для оценки выбранного режима прессования подготовленных образцов с заданным распределением температуры и влажности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ашкенази Е.К.* Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978.

2. *Буевич Ю.А.* Структурно-механические свойства и фильтрация в упругом трещиновато-пористом материале // ИФЖ. 1984. Т.46. № 4.

3. *Дерягин Б.В.* Адгезия твердых тел / Б.В.Дерягин, Н.А.Кротова, В.П.Смилга. М.: Наука, 1973.

4. *Дерягин Б.В.* Свойства и кинетика влаги в пористых телах / Б.В.Дерягин, Н.В.Чураев // Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989.

5. *Дорняк О.Р.* Моделирование реологического поведения древесины в процессах прессования // ИФЖ. 2003. Т.76. № 3.

6. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука,1978.

7. *Уголев Б.Н.* Деформативность древесины и напряжения при сушке. М.: Лесная промышленность, 1964.

8. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесная промышленность, 1986.

9. *Хухрянский П.Н.* Прессование древесины. М.: Лесная промышленность, 1964.