

УДК 539.376:674.812

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ВЯЗКОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОРТОТРОПНОГО КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРЕССОВАНИИ

О. Р. Дорняк

Воронежская государственная лесотехническая академия

Проведено численное исследование процесса прессования древесины березы. Рассмотрено плоское деформированное состояние среды в области с подвижной границей с учетом трения на поверхностях контакта образца и пресс-формы. Постановка задачи осуществлена в рамках механики многофазных систем с учетом сложного реологического поведения древесины, обусловленного ее вязкоупругими свойствами и влиянием воды граничных слоев. Показано, что степень уплотнения и прочность образцов существенно зависят от их влажности. Внешнее трение приводит к неравномерному уплотнению материала. Увлажнение образца снижает влияние трибоконтакта на структурные характеристики формируемого композита.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность получения ряда материалов с заданными свойствами основывается на управлении процессом формирования их структуры. Модифицированная древесина — перспективный композиционный материал, получаемый путем различных воздействий на натуральную древесину. Среди эффективных методов модифицирования — термомеханический метод, предполагающий прессование древесных образцов после предварительной тепловой обработки. Используемые заготовки имеют, как правило, неоднородное начальное распределение пористости и влажности. В ходе прессования это может привести к их растрескиванию вследствие существенно неоднородного напряженного состояния. На качество композита влияют также фрикционные свойства контактирующих поверхностей образца и матрицы, сказывающиеся на равномерности уплотнения материала. Количественное описание и прогнозирование закономерностей сжатия формируемого композита можно получить математическим моделированием процесса.

Цель работы — исследование процесса вязкоупругого деформирования при прессовании ненасыщенной капиллярно-пористой анизотропной среды с учетом внешнего трения.

Постановка задачи. Заготовка, имеющая форму бруса, помещается в жесткую пресс-форму с открытыми торцевыми гранями (рис. 1). Образец сжимают жестким пуансоном. Скорость перемещения пуансона достаточно мала и поле напряжений удовлетворяет условию квазистационарности. Процесс деформирования является изотермическим. Температура материала и его начальная плотность заданы. Размер длинной стороны образца в несколько раз превосходит его поперечные размеры. Деформации вдоль длинной оси образца считаются пренебрежимо малыми. Полагая, что вдоль оси x_3 распределение нагрузки в зоне контакта пресса и образца практически равномерно, можно утверждать, что имеет место состояние плоской деформации. Материал обладает ортотропными свойствами, главные оси анизотропии параллельны осям координат. Для уменьшения трения материала о стенки матрицы, поверхность пресс-формы смазывают парафином.

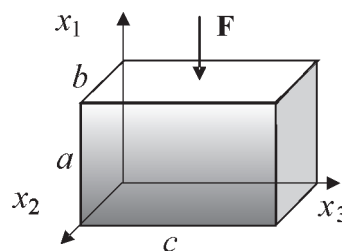


Рис. 1. Схема прессования

В данной работе изучение процессов прессования древесины проводится в рамках механики гетерофазных систем с использованием метода усреднения, справедливо для сред с непрерывной неоднородностью. Уравнения сохранения для микроскопических параметров усредняются по отдельным фазам в предположении, что их характерные размеры значительно превышают размеры структурных элементов и что можно пренебречь пульсационным переносом импульса и энергии во всех трех фазах древесины (твердой, жидкой и газообразной) [1].

Полный тензор напряжений рассматриваемой гетерогенной системы σ^{kl} можно представить как сумму усредненных напряжений в фазах:

$$\sigma^{kl} = \alpha_1 \langle \sigma_1^{kl} \rangle_1 + \alpha_2 \langle \sigma_2^{kl} \rangle_2 + \alpha_3 \langle \sigma_3^{kl} \rangle_3;$$

$$\alpha_i = \frac{dV_i}{dV}; \quad \langle \sigma_i^{kl} \rangle_i = \frac{1}{dV} \int_{dV_i} \sigma_i^{kl} d'V.$$

где α_i , V_i — объемная концентрация и объем i -фазы, $i = 1, 2, 3$ (1 — газообразная фаза, 2 — жидкость, 3 — твердая фаза); ' (штрих) относится к параметрам, являющимся средними в пределах микрообъема $d'V \ll a^3$, a — характерный размер пор.

Математическая постановка задачи включает уравнения равновесия [1]:

$$\frac{\partial (\alpha_3 \langle \sigma_3^{11} \rangle_3)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\alpha_3 \langle \sigma_3^{12} \rangle_3)}{\partial x_2} + p_3 \frac{\partial \alpha_3}{\partial x_1} + R_{13}^1 + R_{23}^1 = 0;$$

$$\frac{\partial (\alpha_3 \langle \sigma_3^{12} \rangle_3)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\alpha_3 \langle \sigma_3^{22} \rangle_3)}{\partial x_2} + p_3 \frac{\partial \alpha_3}{\partial x_2} + R_{13}^2 + R_{23}^2 = 0;$$

$$p_3 = -\frac{1}{3} \langle \sigma_3^{jj} \rangle_3; \quad i = 1, 2, 3.$$

Здесь R_{13}^j, R_{23}^j ($j = 1, 2$) — проекции сил сопротивления фильтрационному переносу жидкой и газообразной фаз в пористом материале.

Для малых деформаций, принимая постоянной плотность древесинного вещества, из уравнения сохранения массы твердой фазы можно получить соотношение

$$\varepsilon_3^{kk} - \varepsilon_{30}^{kk} = -(\alpha_3 - \alpha_{30}) / \alpha_{30}; \quad k = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Деформации удовлетворяют соотношениям Коши

$$\varepsilon_3^{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle h_3^{ij} \rangle_3}{\partial x^i} + \frac{\partial \langle h_3^{ji} \rangle_3}{\partial x^j} \right); \quad i, j = 1, 2. \quad (3)$$

Здесь $\varepsilon_{30}^{kk}, \varepsilon_3^{kk}$ — i -й инвариант тензора деформаций твердой фазы в некоторый начальный и текущий момент времени, а α_{30}, α_3 — соответствующие концентрации третьей фазы; $\langle h_3^{ij} \rangle_3$ — усредненные смещения твердой фазы. При сделанных выше предположениях $\langle h_3^{ii} \rangle_3 = \langle h_3^{ii}(x_1', x_2') \rangle_3$; $\langle h_3^{33} \rangle_3 = 0$.

Древесина — анизотропный структурно-неоднородный материал на основе комплекса природных полимеров. Наличие в клеточных стенках огромного количества субмикроскопических капилляров приводит к образованию тонких слоев связанной воды. Наличие такой воды в древесине существенно влияет на ее физико-механические свойства. Специфические свойства древесины затрудняют расчеты процессов ее интенсивного деформирования, приводящих к изменению поровой структуры и полей влагосодержания. Для описания напряженно-деформированного состояния древесины при изменении ее микроструктуры используется феноменологическая модель, сформулированная в [2]. Эта модель получена путем обобщения реологического уравнения среды с двойной пористостью на случай ненасыщенной системы [3]. Учтено, что структурный каркас и материал, из которого он сформирован, проявляют свойства наследственной термочувствительной среды. Особенность этого уравнения в том, что оно явным образом содержит значения объемного содержания воды, паровоздушной смеси и древесинного вещества. Уравнение имеет вид:

$$\varepsilon^{ij} = \Pi_s^{ijkl}(0) \left[\frac{\sigma^{kl} + \alpha_2 p_2 \delta^{kl} + \alpha_1 p_1 \delta^{kl}}{\alpha_3} + \int_0^t K_s^{ijkl}(t - \tau) \frac{\sigma^{ij} + \alpha_2 p_2 \delta^{ij} + \alpha_1 p_1 \delta^{ij}}{\alpha_3} d\tau \right] + \Lambda_s^{ij} \Theta_3 + \Pi_f^{ijkl}(0) \left[\frac{\sigma^{kl}}{1 - m_n} + \beta_2 p_2 \delta^{kl} + \beta_1 p_1 \delta^{kl} + \int_0^t K_f^{ijkl}(t - \tau) \left(\frac{\sigma^{ij}}{1 - m_n} + \beta_2 p_2 \delta^{ij} + \beta_1 p_1 \delta^{ij} \right) d\tau \right];$$

$$\beta_1 = \frac{m_n \alpha_{n1}}{1 - m_n} + \alpha_{k1}, \quad \beta_2 = \frac{m_n \alpha_{n2}}{1 - m_n} + \alpha_{k2}; \quad (4)$$

$$\alpha_{n1} + \alpha_{n2} = 1, \quad \alpha_{k1} + \alpha_{k2} = 1.$$

Здесь ε_3^{ij} — тензор макродеформаций твердой фазы, определяемый градиентами средних смещений материала; K^{ijkl} — тензор функций скорости ползучести; Λ^{kl} — тензор коэффициентов температурного расширения, K^{-1} ; $\Pi^{ijkl}(0)$ — тензор мгновенных податливостей, Pa^{-1} ; p — давление, Pa ; t — время, s ; Θ — разность между текущей температурой и некоторым ее начальным значением, K . Верхние индексы i, j, k, l используются для обозначения компонент тензоров; Нижние индексы f относятся к эффективным значениям (древесному скелету); s — к материалу древесного скелета; n — к системе макропор; k — к системе капилляров; m_n — пористость, определяемая отношением объема макропор к объему материала; α_{ki}, α_{ni} ($i = 1, 2$) — объемное содержание i -й фазы в объеме капилляров и пор соответственно.

Если влажность материала ниже предела гигроскопичности и свободная вода отсутствует, то $\alpha_{n2} = 0$ и $\beta_2 = \alpha_{k2}$. Если предполагать, что влага находится преимущественно в тонких слоях, то $p_2 \approx p_{2т.сл}$. Таким образом, величина $\beta_2 p_2$, входящая в реологическое уравнение состояния, определяется расклинивающим давлением тонких прослоек воды и объемным содержанием воды в капиллярной системе. При влажности материала большей предела гигроскопичности капилляры полностью заполнены водой, $\alpha_{k2} = 1$, а величина $\beta_2 = m_{св} / (1 - m_n) + 1$ ($m_{св}$ — объемное содержание свободной воды).

Давление воды в тонкой прослойке $p_{2т.сл}$ отличается от давления p_0 в объемной жидкой фазе, равновесной с прослойкой, на величину расклинивающего давления P [4]:

$$p_{2т.сл} = p_0 + P. \quad (5)$$

Соотношение (5) справедливо для давления в жидких пленках древесного образца только в равновесных условиях, когда в результате внешних воздействий твердые границы прослойки перемещаются с бесконечно малой скоростью или вообще не подвержены смещениям, т.е. структурный каркас пористой системы не деформируется.

Возможный источник неравновесности — диссипация энергии вследствие вязкого сопротивления, сопровождающего втекание жидкости в расширяющийся зазор при растяжении капиллярно-пористой структуры или ее вытекание из сжимающегося канала при сдавливании [5]. Вязкое сопротивление обуславливает неравновесную составляющую расклинивающего давления жидкой фазы при деформировании насыщенных и ненасыщенных капиллярно-пористых тел.

Учитывая, что добавочное давление в жидкой фазе Δp_2 , связанное с деформированием пористой системы зависит от толщины жидких прослоек, а значит от влагосодержания, и также от силы сопротивления сдавливанию или отрыву твердых поверхностей [5], запишем выражение для расклинивающего давления в тонких слоях жидкой фазы в форме:

$$p_{2т.сл} = p_0 + P + \Delta p_2(w, I_\sigma, T). \quad (6)$$

Здесь Δp_2 — неравновесная составляющая расклинивающего давления, w — влажность, T — температура, I_σ — первый инвариант тензора напряжений в гетерогенной системе. Равновесное расклинивающее давление в прослойках воды P определяется либо с помощью изотерм, либо с использованием теоретических подходов.

Параметры реологической модели, а также составляющие расклинивающего давления применительно к древесине березы были получены путем обработки кривых ползучести при сжатии в главных направлениях анизотропии [6] а также экспериментальных данных по набуханию и усушке [7]. Ядра ползучести представлялись в виде экспоненты:

$$K_n^{ijkl}(t) = d_n^{ijkl} e^{-t/\lambda_n^{ijkl}}; \quad n = s, f,$$

где d — амплитуда функции влияния, λ — время релаксации.

Равновесная составляющая расклинивающего давления аппроксимирована следующей зависимостью (при комнатной температуре)

$$P = 0,0332 - 0,141w + 0,660w^2 - 0,969w^3.$$

Неравновесная часть расклинивающего давления для обеих пород вычисляется как интерполирующая функция трех переменных.

На внешних границах образца при наличии внешнего трения имеют место смешан-

ные граничные условия. Кинематическая часть граничных условий выражает условия непроницаемости

$$\begin{aligned} \langle h_3^1(0, x_2') \rangle_3 &= 0, \\ \langle h_3^2(x_1', 0) \rangle_3 &= 0, \quad \langle h_3^1(x_1', b) \rangle_3 = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

а также совместного деформирования зоны контакта пуансона и уплотняемого композита — равенство нормальных компонент вектора перемещений по всей поверхности контакта

$$\langle h_3^1(a + Y(t), x_2') \rangle_3 = Y(t); \quad Y(t) < 0. \quad (8)$$

Здесь $Y(t)$ — смещение поверхности контакта образца с пуансоном, которое является искомым.

Статическая часть граничных условий выражается законом трения Кулона на внешних поверхностях образца для полных напряжений материала. Нормальная и касательная компоненты вектора напряжений $\bar{\sigma}^v = \bar{\sigma}_\tau^v + \bar{\sigma}_n^v$ на поверхности с нормалью \bar{v} связаны соотношением [8]

$$\bar{\sigma}_\tau^v = -f \frac{\bar{v}_\tau}{|\bar{v}_\tau|} |\bar{\sigma}_n^v|. \quad (9)$$

Выражение (9) справедливо при условии $|\bar{\sigma}_\tau^v| \leq |\bar{\sigma}_n^v|$, в противном случае, когда справедливо $|\bar{\sigma}_\tau^v| > |\bar{\sigma}_n^v|$, $\bar{v}_\tau = 0$. Здесь f — коэффициент внешнего трения, \bar{v}_τ — вектор скорости скольжения материала, $\bar{\sigma}_n^v$ — нормальная компонента вектора напряжения в рассматриваемой частице на площадке, перпендикулярной поверхности скольжения. Последнее условие относится к случаю, когда сдвигающее усилие оказывается меньше величины силы трения.

Закономерности процесса трения обусловлены сложным комплексом физических, механических и химических явлений, имеющих место в контакте. В общем случае они должны учитывать возможные изменения контактной ситуации (геометрических характеристик контакта, кинематики движения, структуры поверхностных и приповерхностных слоев материала, химических соединений на поверхности твердых тел, состояния смазочного слоя и др.) [9].

Нормальные напряжения в зоне контакта удовлетворяют условию:

$$\int_0^b \int_0^c \sigma^{11} dx_1 dx_3 = F, \quad (10)$$

где σ^{11} — нормальная компонента полного тензора напряжений в древесине, F — результирующая сила, приложенная к плите прессы; b, c — размеры верхней грани образца.

Метод численной реализации и расчетные параметры. Поставленная краевая задача (1—4, 7—10) является нелинейной, поскольку заранее неизвестен закон движения нижней грани пуансона и уровень напряжений в теле зависит от объемного содержания фаз, а также в связи с тем, что сила внешнего трения определяется уровнем контактного давления, которое должно быть определено в результате решения задачи. Следовательно, анализ процесса уплотнения материала требует использования численных методов. Для определения перемещений в образце построены конечно-разностные уравнения с помощью метода контрольного объема. Линеаризация системы уравнений проведена методом Ньютона. Матрица полученной системы линейных уравнений является симметричной и разреженной. Для решения системы используется двунаправленный метод сопряженных градиентов, реализуемый после треугольной факторизации основной матрицы. Отметим, что в процессе расчетов оценивается число обусловленности матрицы, представляющее меру ее близости к вырожденности. Устойчивость системы гарантирована конечностью числа обусловленности, причем, чем меньше это число, тем точнее решение [10]. Устойчивость итерационного алгоритма проверялась на сгущающихся сетках. Сравнение численных решений с точными решениями свидетельствует о сходимости разностной схемы. Точные решения использованные, для тестирования численного решения, относились к задаче одноосного стесненного деформирования изотропного и трансверсально-изотропного упругого непористого материала в пресс-форме при нагружении постоянной силой с последующей разгрузкой, а также к задаче одноосного деформирования в пресс-форме ортотропного вязкоупругого непористого материала при ступенчатом нагружении вдоль одной из главных осей анизотропии со специально подобранными реологическими параметрами.

Процесс ползучести развивается во времени, изменяется область деформирования,

что делает необходимым перестройку используемых сеток. На каждом временном шаге учитывается напряженно-деформированное состояние материала, имевшее место на предыдущем шаге по времени.

Важным моментом анализа процесса уплотнения древесной заготовки является оценка ее прочности. В качестве критерия прочности древесины выбран полиномиальный критерий 4 степени, предложенный Е. К. Ашкенази [11]. Этот критерий хорошо зарекомендовал себя для сильно анизотропных материалов.

Известно, что значения пределов прочности уменьшаются с ростом влажности и температуры, но увеличиваются с повышением степени прессования [7]. Принято, что характер влияния этих факторов влажности и температуры одинаков для предельных значений напряжений при любых испытаниях. Учтено линейное изменение значения пределов прочности со степенью прессования [7]. В качестве значений пределов прочности древесины при различных видах испытаний использованы данные, приведенные в [11]. В расчетах силы сопротивления фильтрационному переносу не учитываются.

Расчеты проведены для образцов из древесины березы, поперечное сечение которых имеет первоначально форму квадрата, $a = b$. Отношение $c/a = 5$. Начальное распределение объемного влагосодержания либо однородно по сечению ($w_{20} = 10, 15, 20\%$) либо неоднородно и задается в виде $w_{20} = 15 + 5 \sin(\pi x_1/a) \sin(\pi x_2/b)$. В последнем случае у границ образца влажность 15%, а в центре поперечного сечения 20% ($w_2 = 15 \div 20\%$). Поскольку древесина обладает свойствами коллоидного тела и набухает при насыщении клеточных стенок водой, при влажности меньше, чем предел гигроскопического насыщения, неоднородному содержанию жидкой фазы соответствует неоднородное распределение в материале и твердой фазы. В более сухих областях материал имеет большую концентрацию твердой фазы. Принято, что нагружение осуществляется мгновенно приложенной постоянной силой $F = F_0$ (среднее давление $F_0/bc = 30$ МПа). Температура образца задается одинаковой во всех точках поперечного сечения. $T = 368$ К. Величины $p_{\text{хар}} = 10^8$ Па, $\rho_2 = 10^3$ кг/м³,

$\rho_3 = 1,54 \cdot 10^3$ кг/м³. Приняты следующие значения реологических параметров:

$$\begin{aligned} \Pi_f^{rr}(0) &= 0,528 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}; \quad \Pi_f^{tt}(0) = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}; \\ \Pi_f^{rt}(0) &= -0,182 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}; \quad \Pi_f^{aa}(0) = 0,93 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}; \\ \Pi_f^{ta}(0) &= -0,11 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}; \quad \Pi_f^{ra}(0) = -0,13 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1} \\ S_f^{rt}(0) &= 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}; \quad d_f^{rr} = 0,129 \text{ с}^{-1}; \\ d_f^{tt} &= 0,133 \text{ с}^{-1}; \quad d_f^{aa} = 0,0053 \text{ с}^{-1}; \\ d_f^{rt} &= d_f^{ra} = d_f^{rr}; \quad \eta_f^{rt} = d_f^{rr}; \quad \lambda_f^{rr} = 50,7 \text{ с}; \\ \lambda_f^{tt} &= 37,5 \text{ с}; \quad \lambda_f^{aa} = 150,0 \text{ с}; \\ \lambda_f^{ta} &= \lambda_f^{ra} = \lambda_f^{rt} = 52,5 \text{ с}; \quad v_f^{rt} = \lambda_f^{rr}. \end{aligned}$$

Здесь $S(0), \eta, v$ — мгновенная податливость, амплитуда функции влияния и время релаксации при деформациях сдвига.

$$\begin{aligned} \Pi_s^{tt}(0) &= 0,12 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}; \\ \Pi_s^{rt}(0) &= -0,46 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}; \\ \Pi_s^{aa}(0) &= 0,57 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}; \\ \Pi_s^{ta}(0) &= -0,228 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}; \\ \Pi_s^{ra}(0) &= -0,278 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}; \\ S_s^{rt}(0) &= 0,29 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}; \\ d_s^{kl} &= 0,02 \text{ с}^{-1}; \quad k, l = r, t, a; \\ \lambda_s^{kl} &= 1,241 \cdot 10^5 \text{ с}; \quad k, l = r, t, a; \\ \vartheta_s^{rt} &= \lambda_s^{rr}; \quad \eta_s^{rt} = d_s^{rr}. \end{aligned}$$

Коэффициент трения скольжения f является переменной величиной, зависящей от скорости скольжения, контактного давления, температуры, и по экспериментальным данным изменяется в диапазоне $f = 0,025 \div 0,35(0,4)$ [9]. Поскольку для изучаемых условий трибосопряжения количественные закономерности изменения f не известны, в расчетах коэффициент внешнего трения принят постоянным. Его значение варьируется его от 0 до 0.4.

Результаты расчетов и обсуждение. На рис. 2—6 показаны результаты расчетов, иллюстрирующие особенности, уплотнения древесной заготовки. Внешнее трение в достаточной мере влияет на степень прессования образца с первоначально однородными структурными характеристиками (рис. 2а). Более существенным фактором в

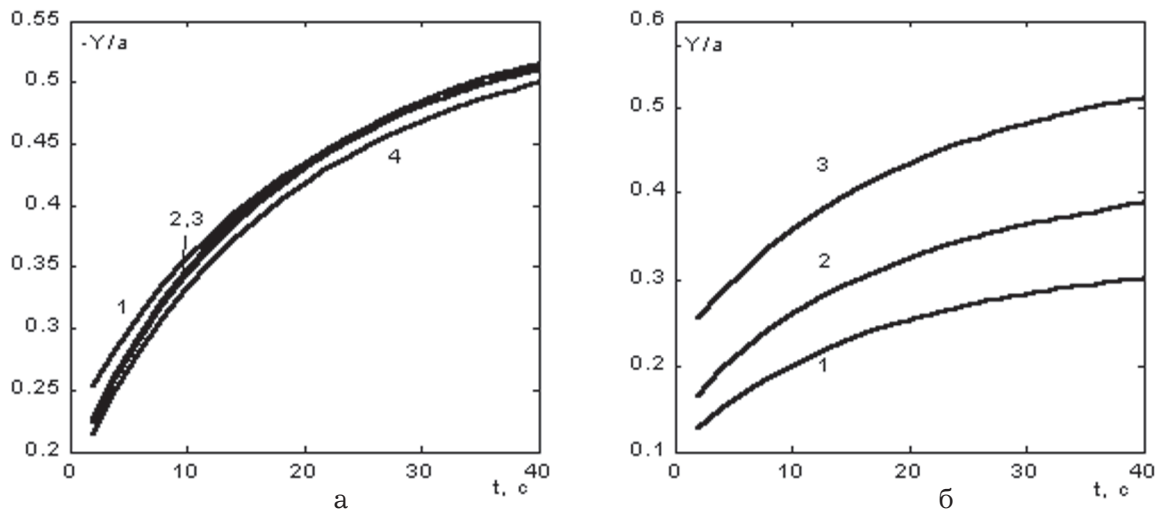


Рис. 2. Изменение степени прессования образцов из древесины березы Y/a в радиальном направлении, рассчитанные для различных значений коэффициента внешнего трения (а) при влажности $w = 20\%$: $f = 0$ — 1, 0.1 — 2, 0.2 — 3, 0.4 — 4 и для различных значений влажности (б) при $f = 0.2$: $w = 10\%$ — 1, 15% — 2, 20% — 3

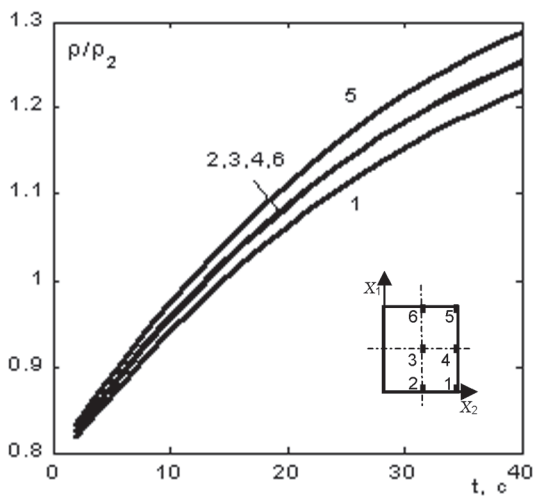


Рис. 3. Изменение плотности ρ формируемого композита в различных точках поперечного сечения образцов при прессовании древесины березы в радиальном направлении, $w=20\%$. Номера кривых соответствуют точкам, указанным на рисунке

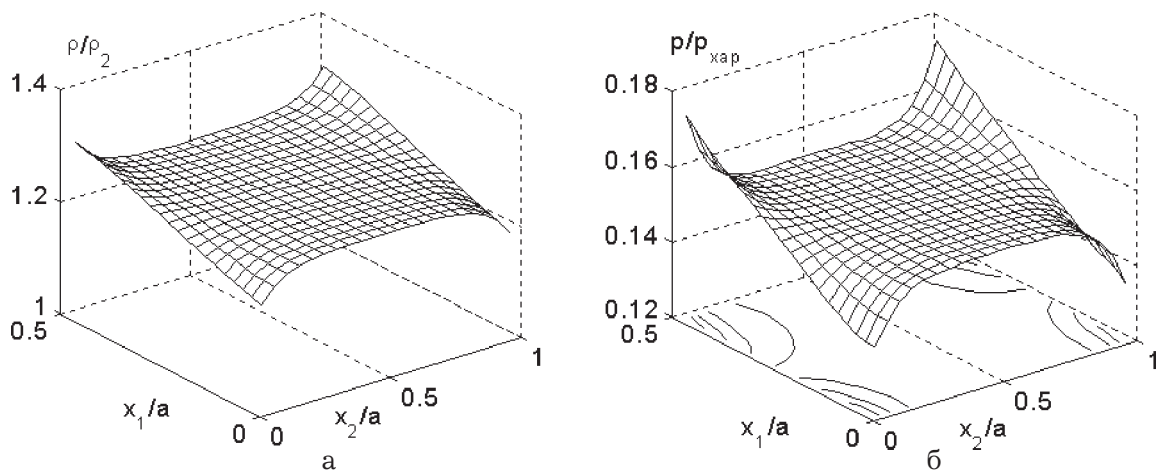


Рис. 4. Распределение в поперечном сечении образца плотности ρ (а) и полного давления в материале p (б) при радиальном прессовании древесины березы с первоначально однородным распределением влажности 20% при $t = 40$ с, $f = 0.2$

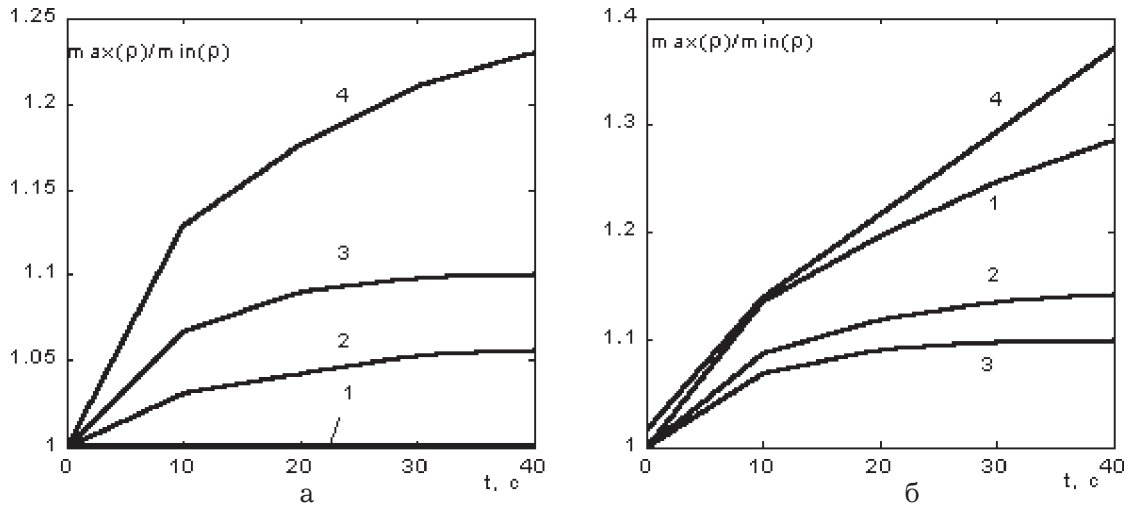


Рис. 5. Изменение отношения значений максимальной и минимальной плотности материала в поперечном сечении образца при прессовании древесины березы в радиальном направлении для различных значений коэффициента внешнего трения (а) при влажности $w = 20\%$: $f = 0$ — 1; 0.1 — 2; 0.2 — 3; 0.4 — 4 и для различных значений влажности (б) при $f = 0.2$: $w = 10\%$ — 1; 15% — 2; 20% — 3; 15—20% — 4

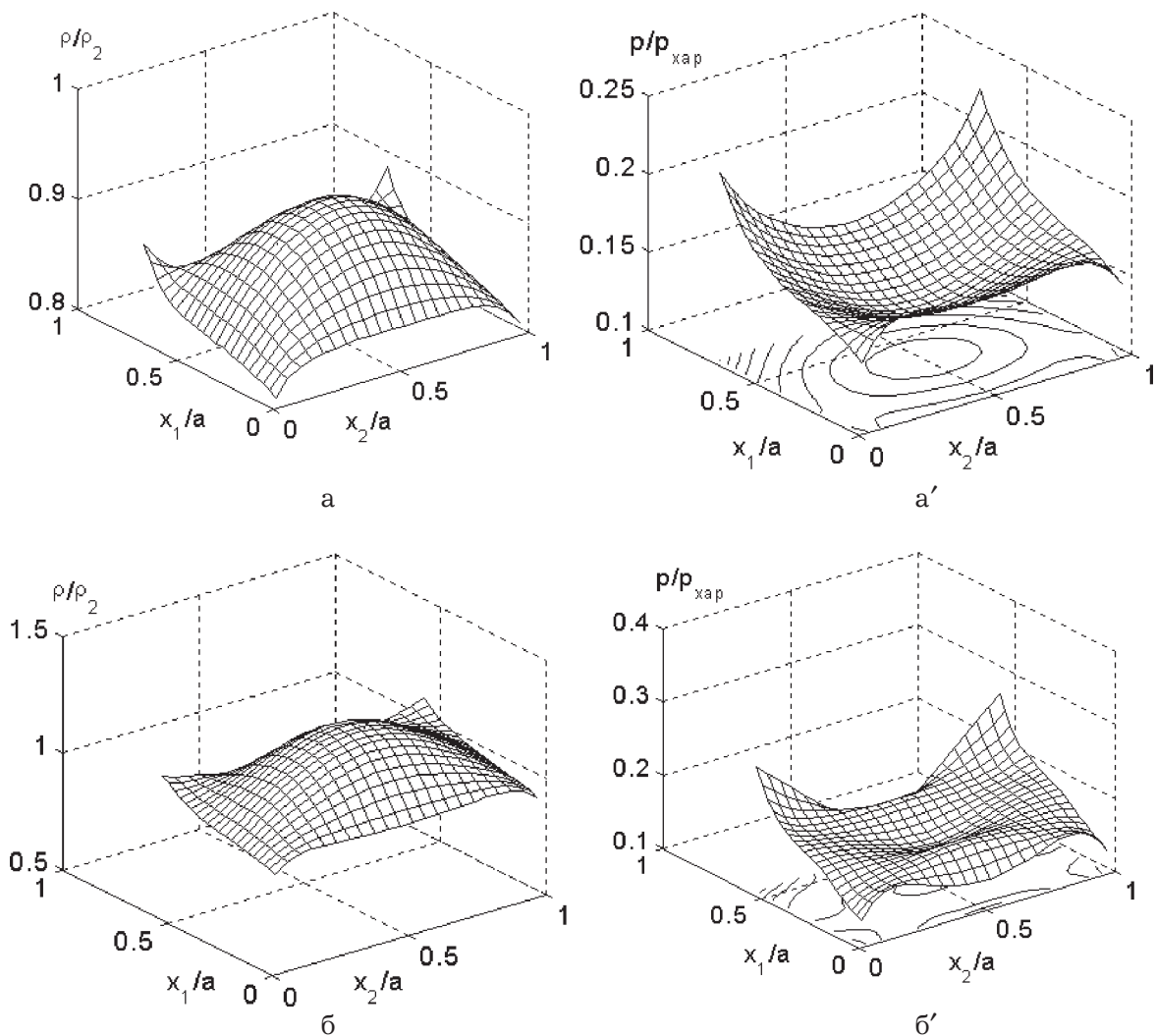


Рис. 6. Распределение в поперечном сечении образца плотности ρ и полного давления в материале p при радиальном прессовании древесины березы с первоначально неоднородным полем влажности $w = 15-20\%$ при $t = 10$ с — а—а'); 40 с — б—б'); $f = 0,2$

данном случае является величина влажности материала (рис. 2б). При более высоких значениях влажности имеют место меньшие значения расклинивающего давления воды в тонких капиллярах, что приводит к снижению сопротивления сжатию ненасыщенной пористой структуры. Расчеты по критерию прочности Е. К. Ашкенази для прессования материала при температуре $T = 368$ К указывают на возможное разрушение образца при влажности 10 и 15 % даже в отсутствие внешнего трения; при влажности 20% повреждений не прогнозируется во всем изучаемом диапазоне изменения коэффициентов трения скольжения f .

На рис. 3 показаны кривые изменения плотности в некоторых точках сечения со временем. Первоначально образец имел одинаковую плотность во всех точках сечения. Влияние внешнего трения на перестройку пористой структуры вблизи поверхностей пресс-формы приводит к неравномерному уплотнению заготовки. Более плотные зоны — в углах вблизи поверхности, передающей давление, менее плотные — в углах у дна матрицы. Для рассмотренных температурно-влажностных условий разница в плотности составляет к концу процесса 7 %.

Характер распределения плотности материала и давления в поперечном сечении образца показан на рис. 4 а,б. Как видно из этого рисунка, касательная нагрузка (силы трения) изменяет первоначально однородную структуру материала. Вследствие сопротивления скольжению вдоль вертикальных стенок матрицы, большему у поверхности пуансона, в верхних углах образца формируется более плотная структура, чем в центральных и нижних зонах (рис. 4а). Более плотный материал обладает большим сопротивлением сжатию (рис. 4б).

Для характеристики степени равномерности уплотнения композита можно рассмотреть отношение величин максимальной и минимальной плотности материала в сечении заготовки (рис. 5). Если в расчетах не учитывать внешнее трение, то образец с первоначально однородными структурными параметрами сохранит однородное строение и после прессования (кривая 1, рис. 5а). С ростом коэффициента трения неравномерность структурных характеристик компози-

та усиливается, причем более интенсивно со временем для больших значений f . При $f = 0,4$ разброс значений плотности составляет более 25 %. Уменьшение влажности материала вызывает к большее сопротивление сжатию и большие касательные нагрузки в зоне трения, что приводит к большей неравномерности полей деформаций и плотности материала (кривые 1—3, рис. 5б). Кривая 4 на рис. 5б соответствует сжатию образца увлажненного в центральной зоне более, чем на периферии ($w = 15 - 20\%$). Неравномерность уплотнения в этом случае выше, чем для образца с однородной влажностью $w = 15\%$ или $w = 20\%$, что связано как с эффектами внешнего трения, так и существенно неоднородным полем напряжений в поперечном сечении заготовки (рис. 6). По критерию прочности Е. К. Ашкенази такие условия сжатия приводят к разрушению образца. Расчеты показывают, что при $t = 10$ с возможно разрушение прежде всего центральных зон поперечного сечения. Распределение давления в этот момент показано на рис. 6 а'. При $t = 40$ с критерий прочности не выполнен ни в одной точке поперечного сечения заготовки.

Заключение. Проведенное численное исследование краевой задачи деформирования капиллярно-пористого влажного тела с учетом внешнего трения образца и пресс-формы показало, что равномерность уплотнения композита существенно зависит от напряженного состояния в зоне трибоконтакта. Чем больше коэффициент трения, тем более неравномерные структурные характеристики получает формируемый композит. Увлажнение образца ослабляет неравномерность уплотнения, обусловленную внешним трением в случае, если распределение влажности по сечению образца было однородным. Влияние значения коэффициента трения на степень прессования не очень значительно (при данном усилии прессования), по сравнению с влиянием величины влагосодержания. Разрушение образца связано с появлением больших градиентов деформаций и напряжений, вызванных, в первую очередь, неоднородным распределением жидкой фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука. 1978. — 336 с.

2. Дорняк О.Р. Моделирование реологического поведения древесины в процессах прессования // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76. № 3. С. 150—155.
3. Бувич Ю.А. Структурно-механические свойства и фильтрация в упругом трещиновато-пористом материале // Инженерно-физический журнал. 1984. Т. 46. № 4. С. 593—600.
4. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко и др. — М.: Химия. 1989. — 288 с.
5. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука. 1973. — 279 с.
6. Баженов В.А., Перельгин Л.М., Семенова Е.А. К вопросу об испытании древесины на сжатие// Труды института леса. 1953. Т.9. С. 315—331.
7. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесная промышленность. 1986. — 368 с.
8. Друянов Б.А., Непершин Р.И. Теория технологической пластичности. — М.: Машиностроение. 1990. — 272 с.
9. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. М.: Машиностроение. 1986. — 224 с.
10. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. — М.: Изд-во МГУ. 1995. — 366с.
11. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность. 1978. — 224 с.