

никает в покрытие. При большой скорости наплавки, когда испарение значительно уменьшается, наблюдается противоположный эффект;

- Наибольший перенос элементов из основы в покрытие и наоборот, из покрытия в основу, наблюдается при дистанции наплавки 12 мм, когда фокус лазерного луча находится на поверхности основы, а наименьший – при дистанции наплавки 14 мм, когда фокус находится над поверхностью основы;

- Все установленные закономерности одинаково действуют во всех исследованных зонах валиков, что свидетельствует о равномерном распределении температуры по сечению валика полученного лазерной наплавкой и одинаковых процессах перемешивания, протекающих во всех зонах валиков.

Литература

1. J. Mazumder, D. Dutta, A. Ghosh, N. Kikuchi, Designed materials: what and how, Proceedings of the SPIE 4831 (2003) 505- 516.
2. T. Wohlers. Wohlers Report – Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry, Wohlers Associates Inc., Colorado, 2003.
3. Koch J, Mazumder J, Rapid prototyping by laser cladding. In: Denney P, Miyamoto I, Mordike BL, editors. Proceedings of ICALEO' 93, 1993, vol. 77: p. 556-65.
4. Mazumder J, Schifferer A, Choi J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure, Mater Res Innovat 1999; 3: 118-31.
5. Keicher DM, Smugersky JE. The laser forming of metallic components using particulate materials. J. Metals 1997; 49 (5): 51-4.
6. Milewski JO, Lewis GK, Thoma DJ & et al. Directed light fabrication a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition. J. Mater Process Tech 1998; 75(1-3): 165-72.
7. E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin, Laser Cladding, CRS Press, Boca Raton, Florida, 2005.
8. J. Th. M. De Hosson, V. Ocelic, Functionally graded materials produced with high power lasers, Proceeding of ASTRA – 2003, Hyderabad, India, 2003. pp. 368-376.
9. C.Y. Liu, J. Lin, Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding, Opt. Laser Technol. 35 (2) (2003) 81-86.
10. Srdja Zecovic, Rajeev Dwivedi, Radovan Kovacevic, Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition, International Journal of Machine Tools & Manufacture. 47 (2007) 112-123.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТИПИЧНЫХ КОЛЛОИДНЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛАХ

Драгун В.Л., Сычевский В.А.

*Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь,
thermo@hmti.ac.by*

В связи с повышением требований к качеству изделий из древесины и энергоэффективности применяемых процессов особую актуальность и значимость приобрела проблема разработки новых технологий сушки и комплексной обработки этих ценных материалов.

Все коллоидные капиллярно-пористые системы в процессе сушки сокращаются. Причем усадка для многих тел может иметь значительную величину. Так при сушке они могут составлять: для ржи, кожи, древесины и угля – 15%, для глины – 30 %, для макарон – 45 %, а для торфа – 120 % и т.д. Поэтому при изучении процессов сушки в коллоидных капиллярно-пористых материалах необходимо учитывать его напряженно-деформированное состояние, а для решения механических задач применять подход Лагранжа.

Рассмотрим двумерную механическую задачу. Примем, что тепло- и массообмен с окружающей средой осуществляется конвекцией. Зададимся такой конвективной сушкой, при которой максимальное значение температуры около 100 °С (лишь в некоторых случаях немного превышающая 100 °С), относительная влажность воздуха ниже 100% и скорость движения агента сушки до 7 м/с. В этих условиях градиентом общего давления можно пренебречь. Не учитывались также и инерционные силы, так как они вносят заметный вклад лишь при сильно нестационарном тепло- и массообмене с внешней средой. Ограничимся несвязанной влагонапряженной задачей, не учитывающей влияние механического деформирования на массоперенос. В рассматриваемом диапазоне режимов процесса сушки поля температуры, влагосодержания и общего давления меняются медленно, поэтому материал успевает отреагировать на их изменения, и с удовлетворительной точностью можно принять, что тело все время находится в статическом равновесии. В физической модели процессов тепломассопереноса учтем, что на распределение температуры оказывают влияние фазовые переходы воды. Движение влаги в материале осуществляется под воздействием как градиента влагосодержания, так и температуры. Реологические и теплофизические свойства материала зависят от температуры и влагосодержания. Для широкого круга задач с хорошим приближением можно воспользоваться реологическим законом Гука. Допустим, отсутствие внешних массовых и поверхностных сил. В этих условиях материал деформируется лишь в результате неравномерности распределения влагосодержания.

Формулировка задачи в переменных Лагранжа требует записи дифференциальных уравнений в криволинейных координатах. Уравнения тепло- и массопереноса с граничными условиями III рода в криволинейных координатах запишем в виде

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^k} \left(g^{kl} \sqrt{g} \lambda_{kl} \frac{\partial T}{\partial x^l} \right) + \varepsilon Q_\phi \rho_0 \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^k} \left(g^{kl} \sqrt{g} a_{wkl} \rho_0 \frac{\partial W}{\partial x^l} \right) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^k} \left(g^{kl} \sqrt{g} a_{wkl} \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial x^l} \right), \quad (2)$$

$$a_w \rho_0 n' \frac{1}{\sqrt{g_{ii}}} \frac{\partial W}{\partial x^i} = \alpha_w \rho_0 (W_p - W), \quad (3)$$

$$\lambda n' \frac{1}{\sqrt{g_{ii}}} \frac{\partial T}{\partial x^i} = \alpha (T_c - T) - \rho_0 Q_\phi (1 - \varepsilon) \alpha_w (W - W_p), \quad (4)$$

Уравнения движения в перемещениях представим следующим образом

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x^\alpha} (u_{,\alpha}^\alpha) + \mu g^{j\beta} (u_{,\beta})_{,j} + \left(\frac{1}{2} \lambda g^j g^{\alpha\beta} + \mu g_i^\alpha g^{j\beta} \right) \{ (u_{k,\alpha})_{,j} u_\beta^k + u_{k,\alpha} (u_{,\beta})_{,j}^k \} - (3\lambda + 2\mu) \beta \frac{\partial}{\partial x^\alpha} W = 0. \quad (5)$$

Точкой с запятой (;) обозначена ковариантная производная. Ковариантная производная ковариантного и контравариантного векторов соответственно имеют вид

$$u_{i;j} = \frac{\partial u_i}{\partial x^j} - u_m \Gamma_{ij}^m, \quad u^i{}_{;j} = \frac{\partial u^i}{\partial x^j} + u^m \Gamma_{mj}^i, \quad (6)$$

а используемые в выражении (5) вторые производные определяются следующим образом

$$(u_{i,\beta})_{,j} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^j \partial x^\beta} - \frac{\partial u_m}{\partial x^j} \Gamma_{i\beta}^m - u_m \frac{\partial \Gamma_{i\beta}^m}{\partial x^j} - \frac{\partial u_m}{\partial x^\beta} \Gamma_{ij}^m + u_l \Gamma_{m\beta}^l \Gamma_{ij}^m - \frac{\partial u_i}{\partial x^m} \Gamma_{\beta j}^m + u_l \Gamma_{lm}^l \Gamma_{\beta j}^m, \quad (7)$$

$$(u_{,\beta}^k)_{,j} = \frac{\partial^2 u^k}{\partial x^j \partial x^\beta} + \frac{\partial u^m}{\partial x^j} \Gamma_{m\beta}^k + u^m \frac{\partial \Gamma_{m\beta}^k}{\partial x^j} + \frac{\partial u^m}{\partial x^\beta} \Gamma_{mj}^k + u^l \Gamma_{l\beta}^m \Gamma_{mj}^k - \frac{\partial u^k}{\partial x^m} \Gamma_{\beta j}^m - u^l \Gamma_{lm}^l \Gamma_{\beta j}^m. \quad (8)$$

Дивергенция вектора перемещений имеет вид

$$u_{;\alpha}^\alpha = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^\alpha} (g^{am} \sqrt{g} u_m). \quad (9)$$

Уравнения (5) – (9) следует дополнить соотношениями

$$g_{ij} = 2\varepsilon_{ij} + g_{0ij}, \quad g^j g_{jk} = \delta_k^j, \quad g = \det g_{ik}, \quad \Gamma_{ik}^l = \frac{1}{2} g^{ml} \left(\frac{\partial g_{im}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{km}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^m} \right). \quad (10)$$

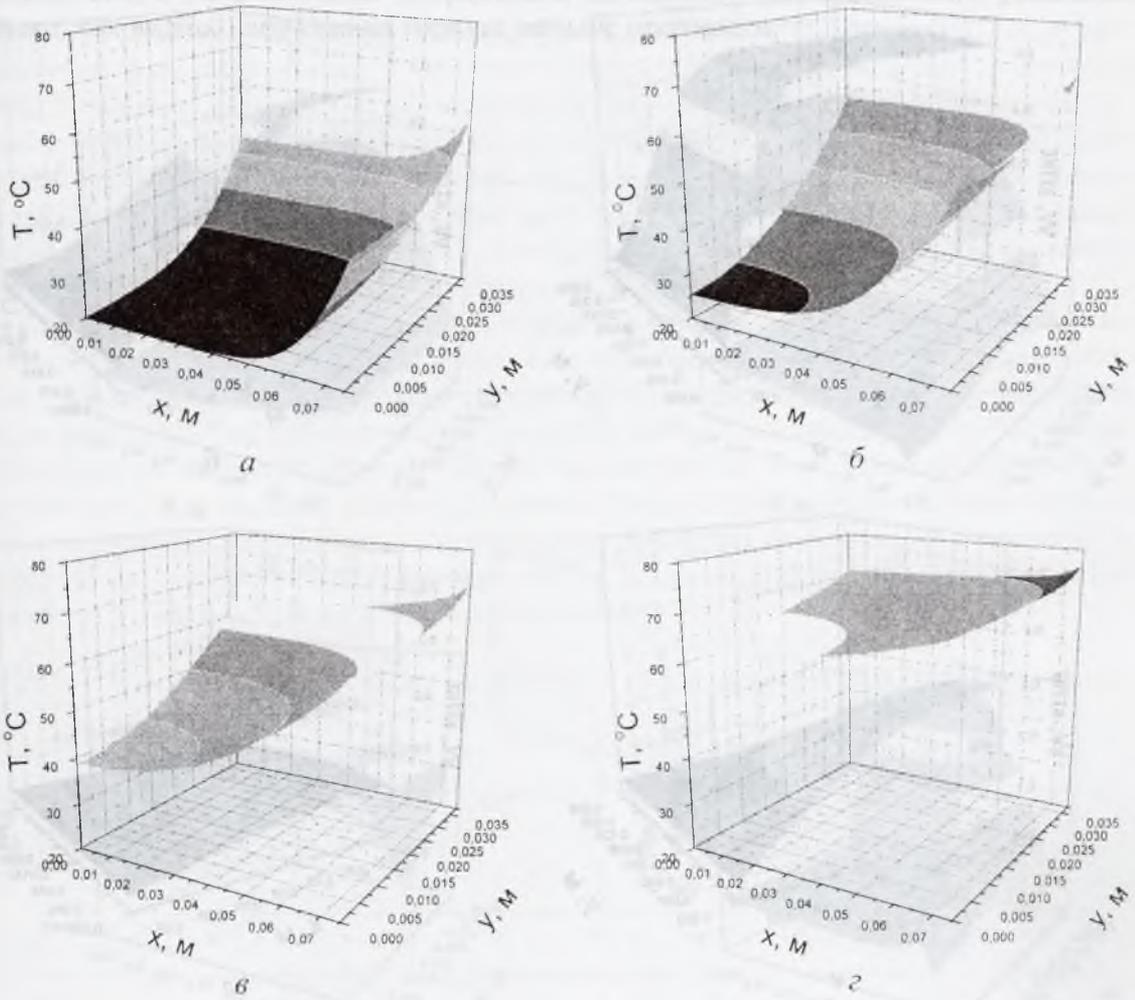
Механические граничные условия в перемещениях с учетом влажностных деформаций запишем в виде

$$\left(\lambda g^{j\alpha} u_{,\alpha}^j + \frac{1}{2} \lambda g^{j\alpha} g^{\beta\gamma} u_{k,\alpha}^k u_{,\beta}^j + \mu g^{i\alpha} u_{,\alpha}^j + \mu g^{j\beta} u_{,\beta}^i + \mu g^{i\alpha} g^{j\beta} u_{k,\alpha}^k u_{,\beta}^j - (3\lambda + 2\mu) \beta g^{j\alpha} \Delta W \right) n_j = 0. \quad (11)$$

Таким образом, уравнения (1) – (11) дают математическую модель взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса и напряженно-деформированного состояния материала, подчиняющегося закону Гука.

Поставленная задача решена методом конечных элементов.

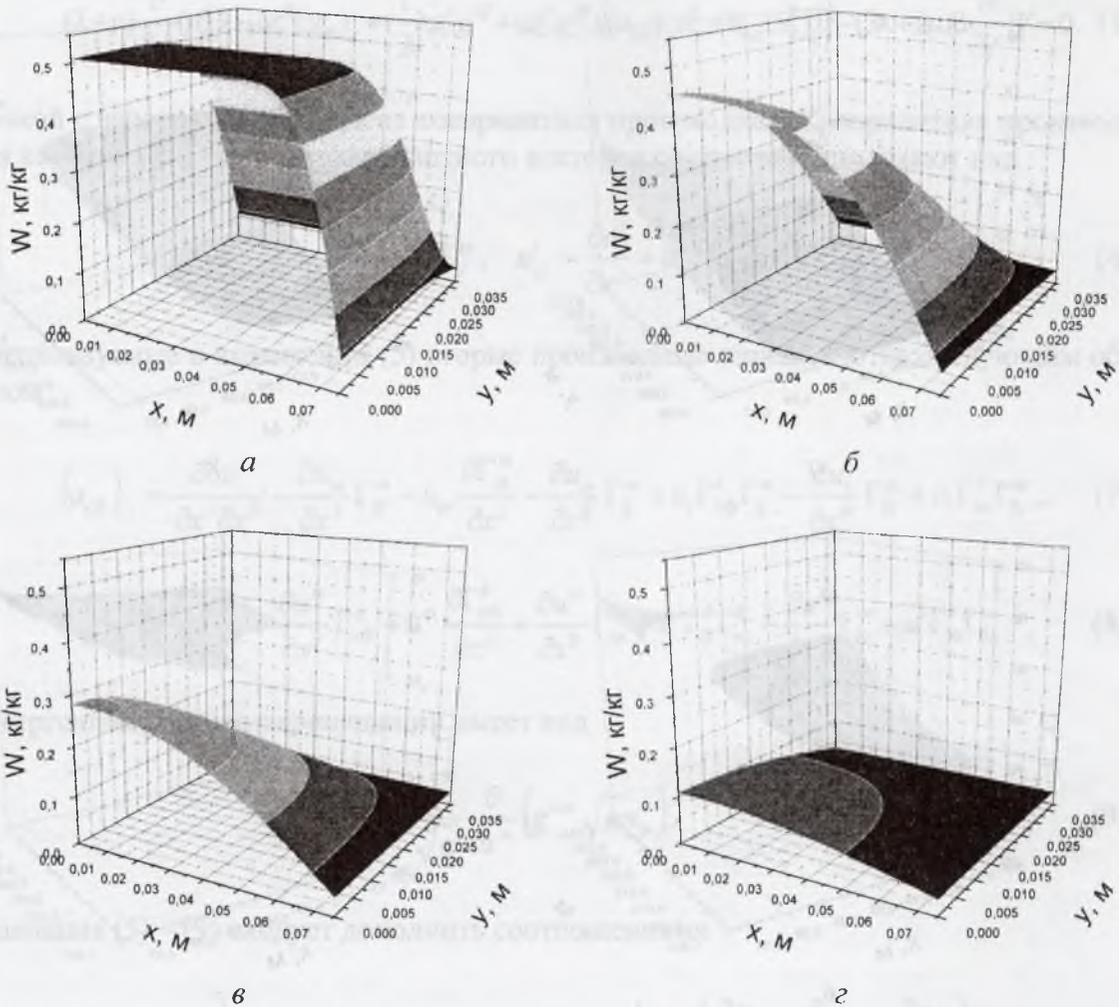
На основе проведенных расчетов изучен процесс сушки древесины. Обладая внутренним сопротивлением переносу тепла и влаги, материал прогревается и сохнет неравномерно, имея сложное распределение влияющих друг на друга полей температуры и влагосодержания, которое формирует напряженно-деформированное состояние. На рисунке 1 приведено типичное распределение температуры в теле для моментов времени 0,1, 0,3, 0,6 и 1,4 ч, а на рисунке 2 представлено типичное распределение влагосодержания в материале для моментов времени 6, 36, 80 и 160 ч.



а) – 0,1 ч; б) – 0,3; в) – 0,6; г) – 1,4

Рис. 1. Типичное распределение температуры в материале для различных моментов времени

Градиенты влагосодержания приводят к образованию напряжений в материале, способных вызвать его разрушение. Рассмотрим напряжения, возникающие в материале, которые в двумерном плоском напряженном состоянии описываются компонентами σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{xy} . Исходя из типичных распределений напряжений в материале (рисунок 3), можно проследить одну закономерность: максимальные значения величин σ_{xx} , σ_{yy} и σ_{xy} находятся вблизи поверхностей материала, во всех других точках они имеют много меньшие значения. Отсюда можно сделать вывод о необходимости контроля напряжений на поверхности тела. Такой контроль позволяет исключить возникновение трещин на самой поверхности в начальный период сушки за счет образования больших градиентов влагосодержания и в центре тела в конце сушки в результате развития пластических деформаций.



а) – 6 ч; б) – 36; в) – 80; г) – 160

Рис. 2. Типичное распределение влагосодержания в материале для различных моментов времени

Проведены расчеты режимов низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны от 1-М до 8-Н по ГОСТ 19773-84 [18].

В качестве примера представлено развитие прочности и напряжений в материале (сосна) во времени для режимов 4-М, 4-Н и 4-Ф (рисунок 4). Параметры данных режимов представлены в таблицах 1 – 3. При расчетах принималось, что влагосодержание на пределе гигроскопичности $W_{п.г}$ для режимов: 4-М – $W_{п.г}=0,25$; 4-Н – $W_{п.г}=0,21$; 4-Ф – $W_{п.г}=0,19$.

На рисунке от точки 1 (вертикальная черта на оси времени) влево изображен этап прогрева материала, температура которого на 8°C выше, чем температура первого этапа сушки при влажности воздуха $0,95 - 0,97$, что обеспечивает очень низкий влагообмен с агентом сушки. На этапе прогрева прочность древесины в рассматриваемых точках поверхности падает, так как влагосодержание практически остается постоянным, а температура резко повышается. От точки 1 до точки 2 реализуется первый этап сушки. Прочность в указанных точках резко возрастает благодаря уменьшению влажности и температуры поверхности. Когда влагосодержание поверхности и прилегающего к нему слоя материала опустится ниже предела гидро-

скопичности, в нем появятся напряжения, вызванные недопущенными усадками. Однако, как видно, напряжения гораздо меньше прочности.

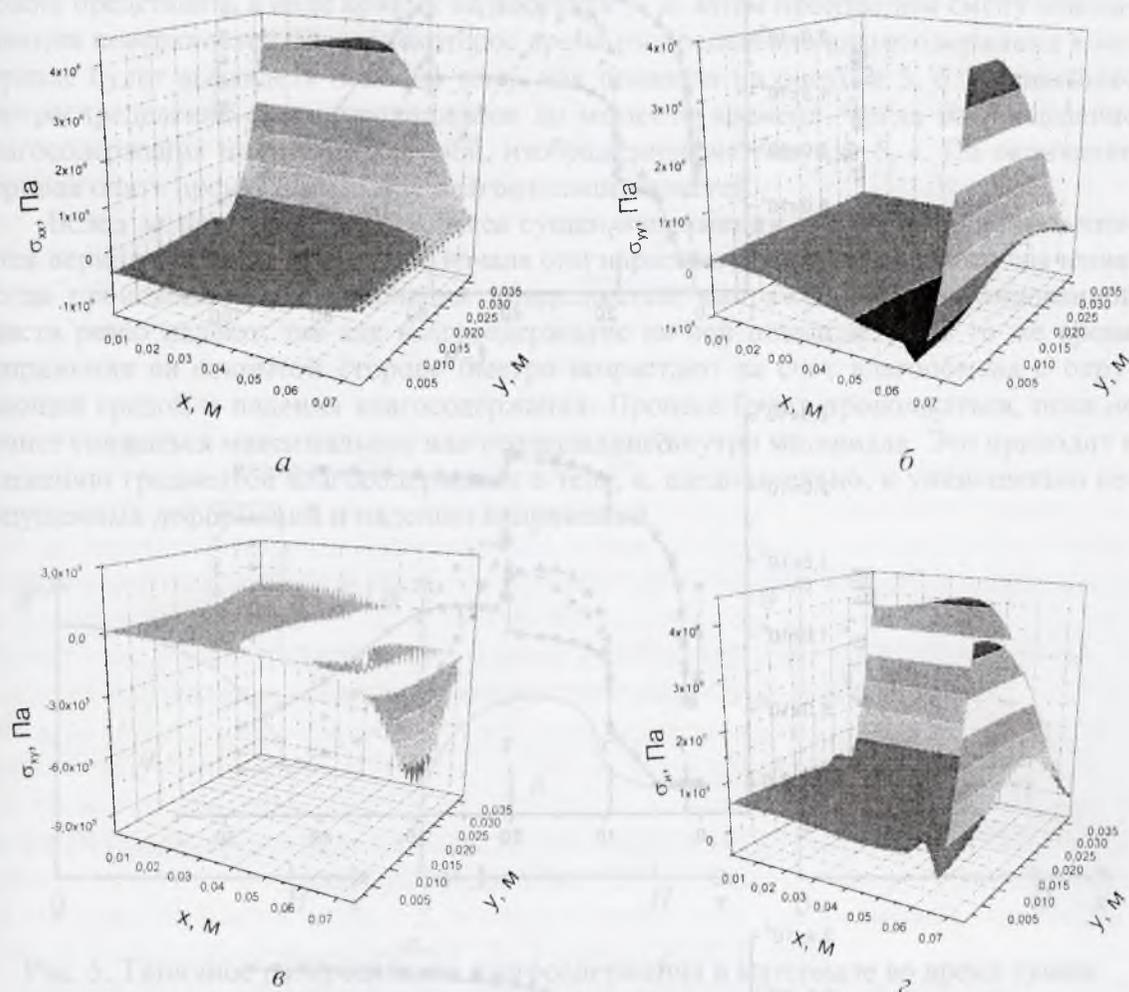
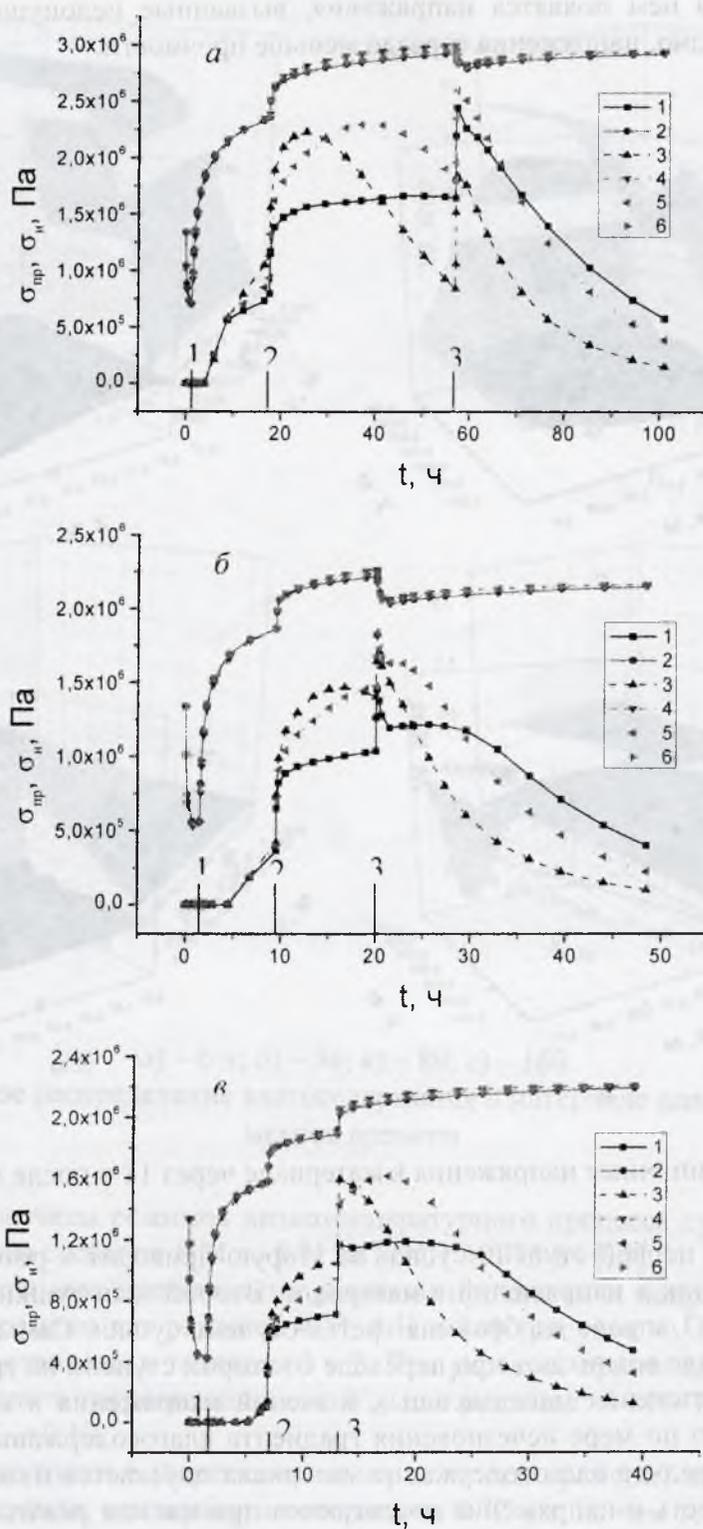


Рис. 3. Типичные напряжения в материале через 18 ч после начала сушки

Переход с первой ступени сушки на вторую приводит к резкому возрастанию как прочности, так и напряжений в материале. Второй этап сушки отмечен точками 2 и 3. От точки 3 вправо изображена третья ступень сушки. Самые большие напряжения в материале возникают при переходе со второй ступени на третью.

После достижения максимальных значений напряжения в материале падают, стремясь к нулю по мере исчезновения градиента влагосодержания. Расчет прекращается, когда среднее влагосодержание материала опускается ниже 0,06 кг/кг. Наибольшая прочность и напряжения достигаются при мягком режиме сушки (рисунок 4). Они уменьшаются для нормального режима сушки и принимают наименьшие значения для форсированного. Эта же тенденция сохраняется для всех режимов сушки.



а) – режим 4-М; б) – режим 4-Н; в) – режим 4-Ф, где кривые обозначают: 1, 2 – напряжение и прочность в центре верхней поверхности; 3 – напряжение и прочность в центре боковой поверхности; 5 – напряжение и прочность возле края материала

Рис. 4. Развитие прочности и напряжений в древесине во времени

На основе разработанной физико-математической модели проведен расчет следующего способа сушки. Изолируем одну пласт, через некоторое время откроем ее

для массообмена и изолируем другую, которая была открытой. Этот процесс продолжаем до тех пор, пока не высушим материал до требуемой влажности. Тогда распределение влагосодержания в материале через некоторый промежуток времени можно представить в виде кривых на рисунках 5, а. Затем производим смену влагоизоляции поверхностей. Через некоторое время распределение влагосодержания в материале будет выглядеть подобно тому, как показано на рисунке 5, б. Дальнейшее перераспределение влаги продолжится до момента времени, когда распределение влагосодержания примет вид кривой, изображенной на рисунке 5, в. По окончании периода опять производим смену влагоизоляции пластей.

Вслед за циклическостью процесса сушки напряжения в материале также меняются периодически (рисунок 6). Сначала они нарастают до максимального значения. Когда происходит смена изоляции поверхностей, напряжения на изолированной пластине резко падают, так как влагосодержание на ней повышается. В то же время напряжения на открытой стороне быстро возрастают за счет влагообмена с окружающей средой и падения влагосодержания. Процесс будет продолжаться, пока не начнет снижаться максимальное влагосодержание внутри материала. Это приводит к снижению градиентов влагосодержания в теле, а, следовательно, к уменьшению недопущенных деформаций и падению напряжений.

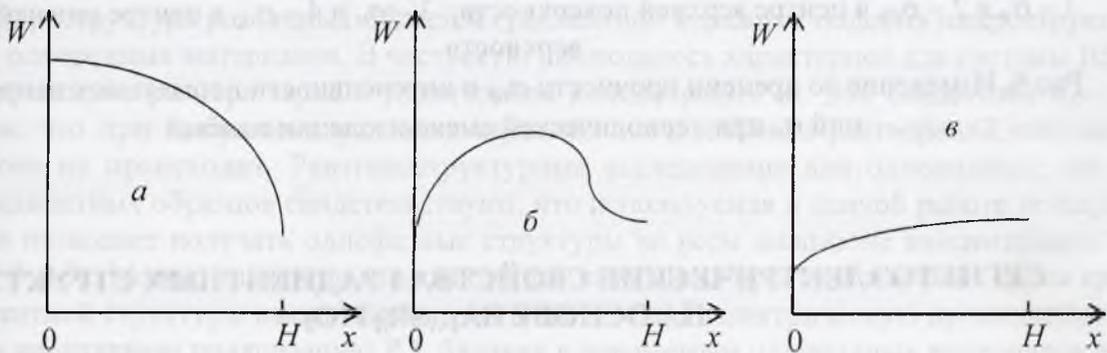
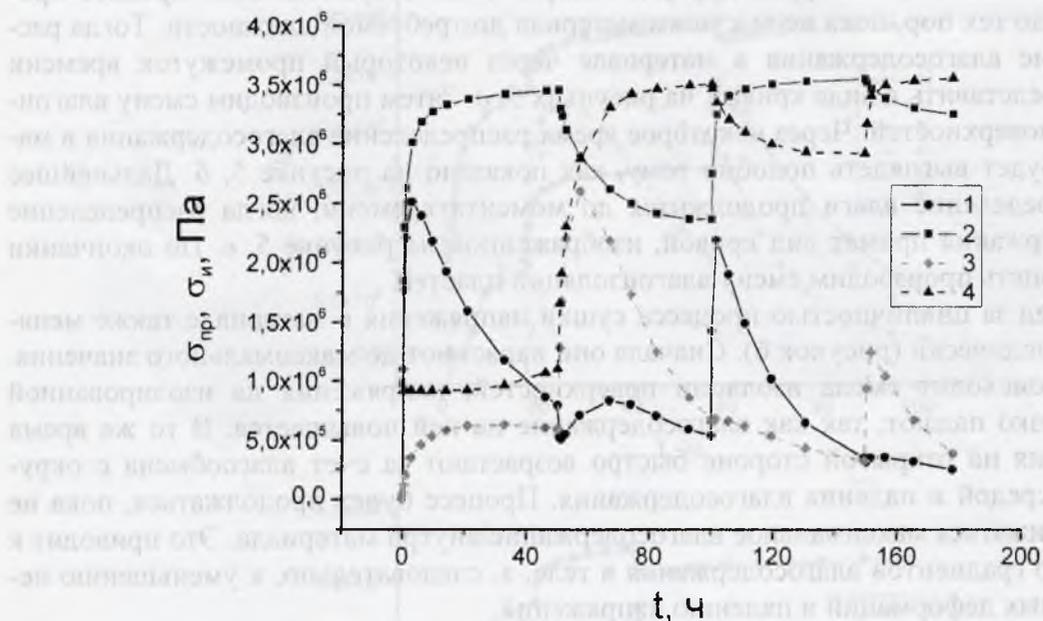


Рис. 5. Типичное распределение влагосодержания в материале во время сушки при периодической смене изоляции пластей

Циклический характер изменения имеет и прочность на поверхностях материала (рисунок 6), в то же время напряжения никогда ее не превышают. В результате численных экспериментов установлено, что при уменьшении времени цикла наступает такой момент, когда напряжения в материале превышают его прочность, т.е. произвольно малый период времени брать нельзя.

Таким образом, в работе представлена физико-математическая модель взаимосвязанных процессов тепломассопереноса и развития напряженно-деформированного состояния в дисперсных и коллоидных капиллярно-пористых материалах. Даны комплексные решения задач тепломассопереноса и развития напряженно-деформированного состояния древесины. Проведены численные расчеты технологического процесса сушки на основе ГОСТ 19773-84 «Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия». Осуществлен расчет сушки пиломатериалов за счет поочередной изоляции их пластей, что позволило предложить новый циклический способ сушки.



1 – $\sigma_{и}$ и 2 – $\sigma_{пр}$ в центре верхней поверхности; 3 – $\sigma_{и}$ и 4 – $\sigma_{пр}$ в центре нижней поверхности

Рис.6. Изменение во времени прочности $\sigma_{пр}$ и интенсивности нормальных напряжений $\sigma_{и}$ при периодической смене изоляции пластей

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$

Шут В. Н., Сырцов С. Р., Трубловский В. Л.

Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси
г. Витебск, Республика Беларусь, shut@vitebsk.by

1. Введение

В последние годы достигнут существенный прогресс в получении градиентных (многослойных) сегнетоэлектрических структур различного состава с электрофизическими характеристиками, превосходящими параметры пространственно однородных материалов. Особенно большой объем исследований был выполнен по изучению структур на основе твердых растворов титаната бария-стронция $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ (BST) с пространственным изменением соотношения барий/стронций [1, 2].

Кроме несомненной практической перспективы, градиентные сегнетоэлектрики (graded ferroelectrics, GF) весьма интересны и с научной точки зрения, в плане исследования в них особенностей сегнетоэлектрической неустойчивости, процессов поляризации и т. п. В отличие от однородных сегнетоэлектриков, характеризующихся симметричной петлей гистерезиса относительно осей поляризации P (заряда Q) и приложенного поля E , в некоторых градиентных тонкопленочных структурах наблюдается существенное смещение петли вдоль оси поляризации [3].

Несмотря на значительный объем экспериментальных и теоретических исследований GF, отраженный в большом числе публикаций в авторитетных изданиях, четкого понимания природы поляризационных процессов в градиентных структурах