

## TERMOMECHANICZNY OPIS PROCESU PEŁZANIA DREWNA

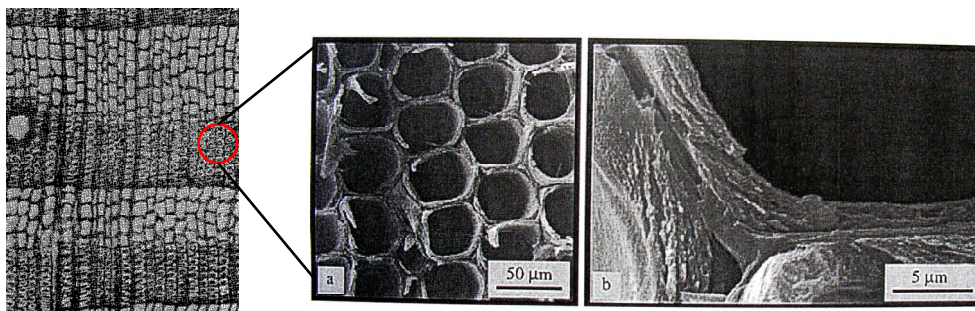
Kamil PAWLIK  
Politechnika Opolska, Opole

### 1. Wprowadzenie

W artykule został przedstawiony termomechaniczny model pełzania drewna. Drewno składa się głównie z celulozy, będzie więc traktowane jako polimer. W procesie uwzględniono różne typy przemian relaksacyjnych zachodzących w polimerach.

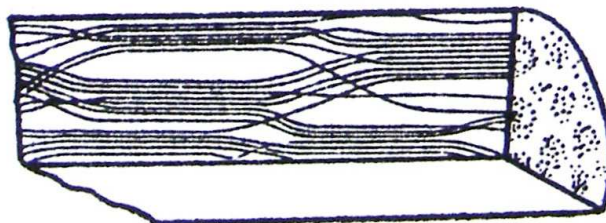
### 2. Model drewna

Na rysunku 1 przedstawiony został przekrój drewna w poprzek włókien.



Rys. 1 Przekrój drewna w poprzek włókien [1]  
Fig. 1 Section of wood across to grain [1]

Widać na nim układ cewek, których błona składa się z wielu warstw zbudowanych z celulozy, hemicelulozy i ligniny. Większość objętości zajmuje błona wtórna zbudowana głównie z celulozy (94% celulozy i hemicelulozy) i w znacznej części ona decyduje o właściwościach mechanicznych drewna. Celuloza ma tak zwaną budowę *micelarno-fredzlową*. Łańcuch molekularne występują tu na przemian w obszarach uporządkowanych (kryształity), gdzie w odległości działania sił van der Waalsa łańcuchy ulegają powiązaniu przez siły międzycząsteczkowe, określanych mianem *micel fredzlowych* oraz nieuporządkowanych (obszary amorficzne), w których łańcuchy celulozy nie są ze sobą powiązane.

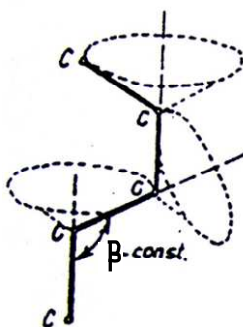


Rys. 2 Część mikrofibryli [2]

Fig. 2 Part of microfibril [2]

Taka budowa drewna powoduje, iż opisywany przez nas proces pełzania będzie przebiegał podobnie jak w polimerach wielkocząsteczkowych. Przyjęto model micelarno-fredzlowy, wymaga to jednak identyfikacji odpowiednich typów relaksacji polimeru [3]. Z przeprowadzonych własnych badań pełzania drewna wynika, że występują tu dwa procesy pełzania, a co za tym idzie dwa typy przemian relaksacyjnych.

W fazie amorficznej może to być relaksacja typu  $\gamma$ , przyporządkowana obrotom ogniów wokół wiązań, którą przedstawia rysunek 3.



Rys. 3 Obrót ogniów z zachowaniem kąta wartościowości [4]

Fig. 3 Chain segments rotation with conservation of valency angle [4]

Przedstawiony mechanizm powoduje tak zwane odkształcenia wysokoplastyczne (sprężyste opóźnione). Są rezultatem zmian konfiguracji wielkocząsteczkowej struktury. Jest on całkowicie odwracalny ale podobnie jak narastanie odkształceń przebiega w określonym czasie [4].

Drugim typem przemian relaksacyjnych mogą być ruchy łańcuchów wzdłuż długości kryształitu lub relaksacje związane z ruchem dużych morfologicznych elementów, np. międzyfibrylarne ścinanie.

Konsekwencją przyjęcia takiego modelu, jest wprowadzenie do modelu termomechanicznego dodatkowych parametrów opisujących wspomniane mechanizmy relaksacyjne.

### 3. Bilanse procesu pełzania drewna

Modelowany ośrodek powinien spełniać podstawowe dla procesów termomechanicznych zasady zachowania masy, pędu, energii i entropii. Przedstawiono je kolejno poniżej [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_i)_{,i} = 0 \text{ – bilans masy,} \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \rho F_i + \sigma_{ij,j} \text{ – bilans pędu,} \quad (2)$$

$$\rho \frac{dU}{dt} = \rho r - q_{i,i} + \sigma_{ij} d_{ij} \text{ – bilans energii,} \quad (3)$$

$$\rho \frac{dS}{dt} \geq \frac{\rho r}{T} - \left( \frac{q_i}{T} \right)_{,i} \text{ – bilans entropii.} \quad (4)$$

Wprowadzając entalpię

$$\rho H = \rho U - \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

i eliminując wspólne składniki z równania (3) i nierówności (4) otrzymano nierówności rezydualnej

$$-\rho \dot{H} + \rho S \dot{T} - \dot{\sigma}_{ij} \varepsilon_{ij} - \frac{q_i T_{,i}}{T} \geq 0. \quad (6)$$

### 4. Równania fizyczne procesu

Punktem wyjścia do dalszych rozważań jest tutaj nierówność rezydualna (6). Jak już wspomniano, z badań wynika, że proces pełzania powodują dwa mechanizmy, dlatego w dalszej części założono, że odkształcenia są sumą odkształceń sprężystych natychmiastowych, sprężystych opóźnionych i lepkich

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^s + \varepsilon_{ij}^v. \quad (7)$$

Odształcenia sprężyste natychmiastowe związanych są ze zmianą odległości między atomami w łańcuchach, natomiast sprężyste opóźnione ze zmianami konformacyjnymi łańcuchów. Mechanizm ten opisuje parametr  $\lambda \in \langle 0,1 \rangle$ , który na początku jest równy 1, a po pewnym czasie  $t_0$  bliski zeru, co oznacza zakończenie procesu. Odształcenia lepkie związane są z lepką dyssypacją energii wynikającą z ruchów łańcuchów względem siebie. Przyjęto więc postać entalpii w formie

$$\rho H = \rho H(\sigma_{ij}, S, \lambda). \quad (8)$$

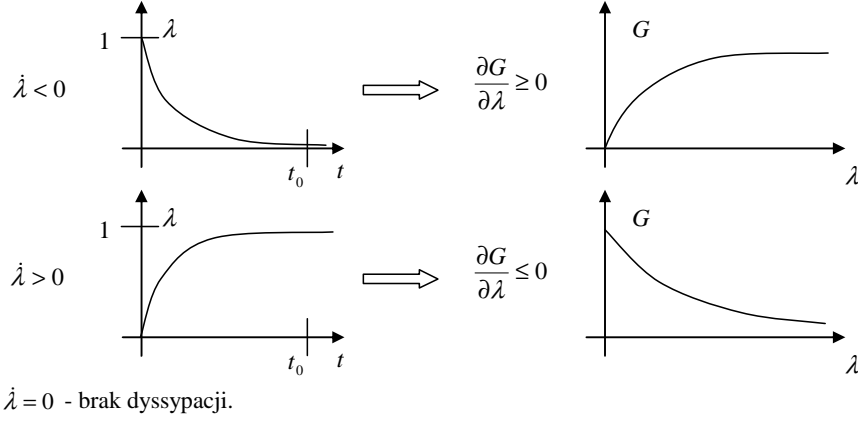
Jest ona zależna nie tylko od naprężeń  $\sigma_{ij}$  i entropii  $S$ , ale również od parametru  $\lambda$  opisującego proces zmian konformacyjnych łańcuchów. Po zróżniczkowaniu (8)

$$\rho\dot{H} = \rho \frac{\partial H}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} + \rho \frac{\partial H}{\partial \lambda} \dot{\lambda} + \rho \frac{\partial G}{\partial S} \dot{S}, \quad (9)$$

podstawiając uzyskany wynik do nierówności (6) i uporządkowaniu otrzymano nierówność

$$\left[ -\rho \frac{\partial H}{\partial \sigma_{ij}} - \varepsilon_{ij} \right] \dot{\sigma}_{ij} + \left[ -\frac{\partial H}{\partial S} + \Theta \right] \dot{S} - \rho \frac{\partial H}{\partial \lambda} \dot{\lambda} - \frac{q_i T_i}{T} \geq 0. \quad (10)$$

Analizując człony dyssypacyjne przy założeniu, że  $T_i = 0$  wynika, że mogą zachodzić trzy przypadki



Biorąc to pod uwagę i zakładając, że jest proces izotermiczny aproksymowano entalpię w postaci

$$\begin{aligned} \rho H = & \rho H^0 - K_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{2} F_{ijkl}^e \sigma_{ij} \sigma_{kl} - \frac{1}{2} F_{ijkl}^\lambda (1-\lambda) \sigma_{ij} \sigma_{kl} - L_{ij} (1-\lambda) \sigma_{ij} + n(1-\lambda) + \\ & - \int_{-\infty}^t L_{ij}^\nu(t-\tau) \dot{\sigma}_{ij}(\tau) d\tau - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t F_{ijkl}^\nu(t-\tau, t-\tau') \dot{\sigma}_{ij}(\tau) \dot{\sigma}_{kl}(\tau') d\tau d\tau'. \end{aligned} \quad (11)$$

Różniczkując funkcjonal (11) oraz wstawiając go do nierówności (10), po uporządkowaniu otrzymano nierówność

$$\begin{aligned} & \left[ K_{ij} + L_{ij}(1-\lambda) + F_{ijkl}^e \sigma_{kl} + F_{ijkl}^\lambda (1-\lambda) \sigma_{kl} + L_{ij}^\nu(0) + \int_{-\infty}^t F_{ijkl}^\nu(t-\tau) \dot{\sigma}_{kl}(\tau) d\tau - \varepsilon_{ij} \right] \dot{\sigma}_{ij} + \\ & + \left( -\frac{1}{2} F_{ijkl}^\lambda \sigma_{ij} \sigma_{kl} - L_{ij} \sigma_{ij} + n \right) \dot{\lambda} + R \geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Nierówność (12) powinna być spełniona dla wszystkich wartości  $\dot{\sigma}_{ij}$ . Oznacza to, że współczynniki przy nich powinny być zerowe. Biorąc pod uwagę, że  $K_{ij} = \varepsilon_{ij}^{e0}$ ,  $L_{ij} = \varepsilon_{ij}^{\lambda 0}$ ,  $n = \lambda^0$  to kolejno początkowe wartości odkształceń sprężystych, odkształceń sprężystych opóźnionych i parametru  $\lambda$  oraz  $L_{ij}^v(0) = 0$  otrzymano równania na odkształcenia

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{e0} + \varepsilon_{ij}^{\lambda 0}(1 - \lambda) + F_{ijkl}^e \sigma_{kl} + F_{ijkl}^\lambda (1 - \lambda) \sigma_{kl} + \int_{-\infty}^t F_{ijkl}^v(t - \tau) \dot{\sigma}_{kl}(\tau) d\tau, \quad (13)$$

oraz ograniczenia

$$\left( -\frac{1}{2} F_{ijkl}^\lambda \sigma_{ij} \sigma_{kl} - \varepsilon_{ij}^{\lambda 0} \sigma_{ij} + \lambda^0 \right) \dot{\lambda} + R \geq 0, \quad (14)$$

gdzie

$$R = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t \frac{\partial F_{ijkl}^v(t - \tau, t - \tau')}{\partial t} \dot{\sigma}_{ij}(\tau) \dot{\sigma}_{kl}(\tau') d\tau d\tau', \quad (15)$$

Z analizy członu

$$\left( -\frac{1}{2} F_{ijkl}^\lambda \sigma_{ij} \sigma_{kl} - \varepsilon_{ij}^{\lambda 0} \sigma_{ij} + \lambda^0 \right) \dot{\lambda} \geq 0 \quad (16)$$

wynikają dwa przypadki:

I. Obciążenie  $\sigma_{ij} \neq 0$ ,  $\varepsilon_{ij}^{\lambda 0} = 0$ ,  $\lambda^0 = 0$

$$-\frac{1}{2} F_{ijkl}^\lambda \sigma_{ij} \sigma_{kl} \dot{\lambda} \geq 0, \quad (17)$$

II. Odciążenie  $\sigma_{ij} = 0$ ,  $\varepsilon_{ij}^{\lambda 0} \neq 0$ ,  $\lambda^0 \neq 0$

$$\lambda^0 \dot{\lambda} \geq 0 \quad (18)$$

Wynika stąd, że przy niezerowych naprężeniach parametr  $\lambda$  musi maleć, a przy braku naprężeń rośnie. Biorąc także pod uwagę, że proces jest zanikający zapostulowano parametr  $\lambda$  w postaci

$$\lambda(t) = \begin{cases} e^{-\gamma t} & \text{dla } \sigma_{ij} \neq 0 \\ 1 + (\lambda(t_0) - 1)e^{-\gamma t} & \text{dla } \sigma_{ij} = 0 \end{cases}, \quad (19)$$

gdzie  $t_0$  to czas zdjęcia obciążenia.

Wstawiając (19) do (13) i zakładając, że początkowe odkształcenia są równe zeru otrzymano ostateczną postać równania na odkształcenia

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^s + \varepsilon_{ij}^c = F_{ijkl}^e \sigma_{kl} + F_{ijkl}^s(\hat{t}) \sigma_{kl} + \int_{-\infty}^t F_{ijkl}^v(t-\tau) \dot{\sigma}_{kl}(\tau) d\tau, \quad (20)$$

gdzie

$$F_{ijkl}^s(t) = \begin{cases} F_{ijkl}^\lambda (1 - e^{-\gamma t}) & \text{- obciążenie,} \\ F_{ijkl}^\lambda (1 - \lambda_1) e^{-\gamma t} & \text{- odciążenie.} \end{cases} \quad (21)$$

Z wykonanych badań pełzania drewnianej belki poddanej czystemu zginaniu (nie zaprezentowanych w niniejszym artykule) wynika, że równanie fizycznego na odkształcenia w formie (20) bardzo dobrze opisuje, zaobserwowane w trakcie eksperymentu, zmienne w czasie odkształcenia badanych próbek.

### Literatura

- [1] Thuvander F., Wallström L., Berglund L. A., Lindberg K. A. H.: Effects of an impregnation procedure for prevention of wood cell wall damage due to drying, Wood Sci. and Tech. 34, s. 473-480, 2001.
- [2] Krzysik F.: Nauka o drewnie, PWN, Warszawa, 1978.
- [3] Ward I. M.: Mechaniczne właściwości polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych, PWN, Warszawa, 1975.
- [4] Hyla I.: Tworzywa sztuczne : własności, przetwórstwo, zastosowanie, Politechnika Śląska, Gliwice, 2004.
- [5] Kubik J.: Elementy termomechaniki, SiM PO, Opole, 2004.

## THERMOMECHANICAL DESCRIPTION OF CREEP OF WOOD

### Summary

In the article the model of wood creep is introduced. The wood consists of cellulose mainly, therefore he is treated as the polymer. In the process The various types of relaxations change in polymers are taken into account in the process.