

dr inż. Zofia Gil<sup>1\*)</sup>prof. dr hab. inż. Romuald Orłowicz<sup>1)</sup>

# Nośność belek drewnianych po wieloletniej eksploatacji

*Load capacity of wooden beams after many years of use*

DOI: 10.15199/33.2015.11.28

(Doniesienie naukowe)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono model obliczeniowy redystrybucji naprężeń normalnych z uwzględnieniem liniowej teorii pełzania w drewnianych belkach eksploatowanych przez wiele lat. W celu określenia stanu naprężeń i odkształceń belek w dowolnej chwili, zastosowano metodę dyskretyzacji kontinuum przestrzenno-czasowego. Wykorzystując przedstawiony w artykule algorytm uwzględniający długotrwały czas obciążenia i nierównomierny rozkład wilgotności, można dowiedzieć, że naprężenie normalne w przekroju zmniejsza się w strefach przypowierzchniowych belki, a zwiększa w strefach rdzeniowych. Jest to korzystna redystrybucja, biorąc pod uwagę rozkład wytrzymałości drewna w przekroju po wieloletniej eksploatacji (określony on został eksperymentalnie w przypadku belek stropodachowych po 140-letniej eksploatacji).

**Słowa kluczowe:** redystrybucja naprężeń normalnych, belki drewniane, spadek wytrzymałości drewna.

**Abstract.** The article presents a computational model of normal stress redistribution in operating for many years, wooden beams, taking into account the linear theory of creep. To determine the state of stress and strain beams at any instant of time, we applied the method of discretization space-time continuum. The analysis algorithm used takes into account the long time to load and uneven distribution of moisture redistribution normal stresses can be seen in cross-section: to reduce their value in the areas of subsurface beams and an increase in core areas. It is a favorable redistribution considering the distribution of strength of wood in the section after many years of exploitation specified experimental research carried out on the roof beams of 140-year life.

**Keywords:** redistribution of normal stresses, wood beams, wood loss of resistance.

Elementy drewniane więźb dachowych i płaskich przekryć przy niewłaściwym użytkowaniu ulegają przyspieszonemu zużyciu technicznemu, objawiającemu się w postaci zmruszałości lub gnicia. Stopień degradacji drewna w najbardziej wyteżonych przypowierzchniowych obszarach przekrojów może się znacznie różnić zarówno w przypadku poszczególnych elementów, jak i na ich długości. Należy nadmienić, że procesy destrukcyjne powodują zwiększenie kruchości drewna, co może prowadzić do jego niszczenia bez wcześniejszych sygnałów ostrzegawczych. W związku z tym w sprawdzających obliczeniach wytrzymałościowych zasadne jest przyjmowanie materiałowych współczynników bezpieczeństwa większych niż wartości normowe. Przykładem tego są przeprowadzone przez nas badania drewnianych belek stropodachów ze ślepego pułapu pochodzące z rozbieranego budynku mieszkalnego wzniesionego w końcu XIX w. Belki były zniszczone zwłaszcza w strefach przypowierzchniowych przekroju. Wilgotność drewna w tych strefach wynosiła nawet 25%, a w strefach rdzeniowych – do 14%. Badania belek na zginanie wykazały kru-

chy, nie ostrzegawczy charakter niszczenia na skutek rozerwania dolnej strefy rozciąganej (fotografia). Zależność między obciążeniem a ugięciem wykazała prawie liniowy charakter. W badaniu uzyskano duży rozrzut wartości nośności belek (powyżej 50%). Warto zauważyć, że obciążenie niszczące o 4 – 5 razy przekraczało wartość obciążenia, przy którym został osiągnięty stan graniczny użytkowości.

Badaniu na ściskanie wzdłuż włókien poddano nieuszkodzone części belek, z których wycięto próbki normowe o przekroju 20 x 20 x 30 mm. Wybrane uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 1. Największą wytrzymałość na ściskanie wykazała rdzeniowa strefa przekroju, natomiast jej spadek stwierdzono w strefach przypowierzchniowych, zwłaszcza narożnych. Potwierdza to, że po wieloletniej eksploatacji nastąpiła degradacja drewna w strefach przypowierzchniowych. Podob-

ny nierównomierny rozkład miał moduł sprężystości drewna. Należy jednak uwzględnić fakt, iż na skutek zjawisk reologicznych wytrzymałość drewna pod długotrwałym obciążeniem maleje w większym stopniu, niż wzrasta jego odkształcalność. Skutkiem nierównomiernego rozkładu modułu sprężystości drewna w przekroju belki jest redystrybucja naprężeń normalnych (dotyczy wysokości i szerokości przekroju). Ten czynnik można uwzględnić w obliczeniach sprawdzających za pomocą opracowanego przez nas modelu obliczeniowego.

Rozpatrywany jest drewniany element, na który działa zmienny w czasie  $\tau$  moment zginający  $M(\tau)$ . Zakłada się, że nawilżanie elementu wzdłuż obwodu przekroju jest równomierne, a rozkład ustabilizowanej wagowej wilgotności drewna  $\omega(\tau)$  w przekroju ustala się eksperymentalnie lub zgodnie z teorią procesów ciepłno-wilgotności-



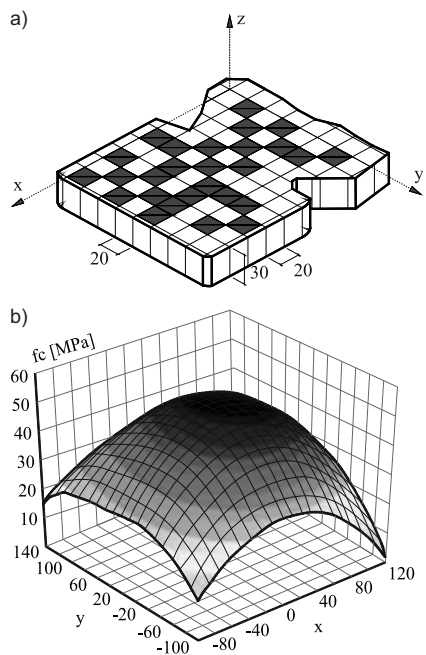
Badanie na zginanie drewnianej belki stropodachowej po 140-letnim okresie eksploatacji

*Bending test of the wooden roof beam after 140-year life time*

[Fot. R. Orłowicz]

<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
e-mail: zofiagil@wp.pl



**Rys. 1.** Schemat wycinania próbek 20 x 20 x 30 mm z przekrojów poprzecznych belek (a) i redystrybucja wytrzymałości na ściskanie drewna w tych przekrojach (b)  
*Fig. 1.* Scheme of sample cutting 20 x 20 x 30 mm from the cross-sectional beam (a) and redistribution of the compressive strength of wood in these cross-sections (b)

wych (rysunek 2). Zależność pomiędzy odkształceniem a naprężeniem opisana jest równaniem (1) liniowej teorii pełzania [1]:

$$\epsilon(t) = \sigma(\tau) \delta(t, \tau) + \int_{\tau_1}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \delta(t, \tau) d\tau \quad (1)$$

gdzie:

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau)$$

E – moduł sprężystości materiału;  
 C (t, τ) – miara pełzania z wyrazem ustalonym eksperymentalnie.

W celu określenia stanu naprężenia i odkształcenia belki w dowolnym czasie, zastosowano metodę dyskretyzacji kontinuum przestrzenno-czasowego. Wydzielono rdzeń przekroju, w którego granicach rozkład wilgotności jest stały, a pozostałą część przekroju podzielono na n-1 warstw koncentrycznych o grubości Δ<sub>j</sub> (j = 1, 2, ..., n-1). Przyjęto, że w granicach grubości Δ<sub>j</sub> naprężenia normalne σ<sub>j</sub>(τ) oraz ustabilizowana wilgotność wagowa ω są stałe (rysunek 2). Rozpatrywany odcinek czasu (t<sub>1</sub> – t) przedstawiono jako zbiór punktów K na osi czasowej τ<sub>1</sub>, τ<sub>2</sub>, ..., τ<sub>i</sub>, ..., τ<sub>k</sub> = t. Zakładając, że w granicach każdego, wystarczająco małego odcinka czasu Δτ = τ<sub>i</sub> – τ<sub>i-1</sub> funkcje M(τ), σ<sub>j</sub>(τ) i ω(τ) są stałe i zmieniają się skokowo na końcu odcinka, przekształca-

jąc równanie (1) w przypadku punktu czasowego τ<sub>i</sub> w postać:

$$\epsilon_j^i - \epsilon_j^{i-1} = \sigma_j^i \delta_j^{i1} + \sum_{k=2}^i (\sigma_j^k - \sigma_j^{k-1}) W_j^{ik} \quad (2)$$

gdzie:

$$\epsilon_j^i = \epsilon_j(\tau_i), \quad \sigma_j^i = \sigma_j(\tau_i), \quad \delta_j^{i1} = \delta_j(\tau_i, \tau_1).$$

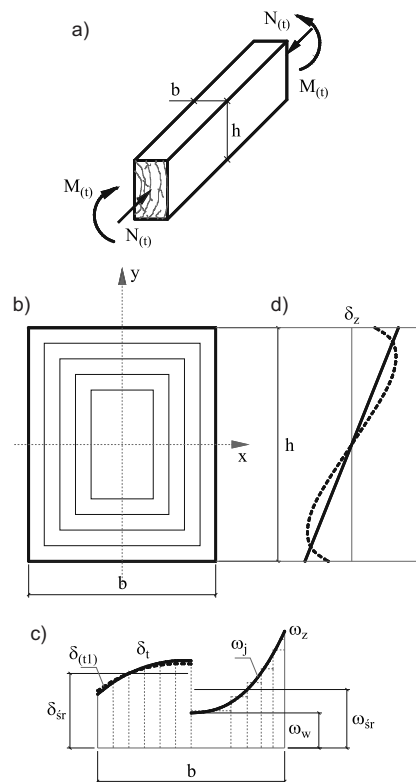
$$W_j^{ik} = W_j(\tau_i, \tau_k) = \frac{1}{(\tau_k - \tau_{k-1})} \int_{\tau_{k-1}}^{\tau_k} \delta(\tau_i, \tau) d\tau$$

Dla całego zbioru punktów czasowych równanie (2) przedstawiono w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_j^1 \\ \epsilon_j^2 \\ \epsilon_j^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_j^{11} & 0 & \dots & 0 \\ \delta_j^{21} - W_j^{22} & W_j^{22} & \dots & 0 \\ \delta_j^{k1} - W_j^{k2} & W_j^{k2} - W_j^{k3} & \dots & W_j^{kk} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_j^1 \\ \sigma_j^2 \\ \sigma_j^k \end{bmatrix} \quad (3)$$

lub

$$[\epsilon_j] = [D_j][\sigma_j] \quad (4)$$



**Rys. 2.** Belka drewniana poddana zmiennemu w czasie τ momentowi zginającemu M(τ) i wilgotności ω(τ): a – schemat obliczeniowy; b – przekrój poprzeczny; c – rozkład naprężeń σ i wilgotności ω wzdłuż szerokości przekroju; d – rozkład naprężeń σ wzdłuż wysokości przekroju

*Fig. 2.* Wooden beam subjected a variable in time τ bending moments M(τ) and humidity ω(τ): a – computational scheme; b – cross-section; c – stress distribution σ and humidity ω on section width; d – stress distribution σ on section height

gdzie:

D<sub>j</sub> – macierz sztywności

σ<sub>j</sub> – macierz naprężeń

ε<sub>j</sub> – macierz odkształceń

Zależność między krzywizną belki ρ(τ) a momentem zginającym M(τ) w czasie przedstawimy analogicznie wzorem (1) w postaci:

$$\rho(\tau) = \frac{M(\tau)}{E(\tau)J} \bar{\delta}(t, \tau) + \int_{\tau_1}^t \frac{\partial M(\tau)}{\partial \tau} \frac{\bar{\delta}(t, \tau)}{E(\tau)J} d\tau \quad (5)$$

gdzie:

$$\bar{\delta}(t, \tau) = 1 + E(\tau) C(t, \tau)$$

Uwzględniając dyskretyzację osi czasowej, równanie (5) dla każdej j-tej warstwy i rdzenia przekroju można przedstawić w postaci macierzowej:

$$[\rho_j] = [D_j][M_j] J_j^{-1} \quad (6)$$

gdzie:

J<sub>j</sub> – moment bezwładności j-tej warstwy względem osi OX;

M<sub>j</sub> – moment zginający dolnej warstwy.

Z warunku zgodności odkształceń przy zginaniu rdzenia i pozostałych warstw przekroju [ρ<sub>j</sub>] = [ρ<sub>j-1</sub>] oraz równowagi statycznej  $\sum_{j=1}^n [M_j] = [M]$ , uwzględniając również macierz (6) otrzymano:

$$[M_1] = \left[ [\bar{E}] + \sum_{j=2}^n [D_1][D_j]^{-1} J_j J_1^{-1} \right]^{-1} [M] \quad (7)$$

$$[M_j] = [D_1][D_j]^{-1} [M_1] J_j J_1^{-1} \quad (8)$$

Maksymalne naprężenia normalne, wywołane momentem zginającym w każdej j-tej warstwie, określamy ze wzoru:

$$[\sigma_j]_M = [M_j] J_j^{-1} Y_j \quad (9)$$

### Wnioski

Zgodnie z wymienionym algorytmem na rysunku 2c i d przedstawiono uzyskane wykresy naprężeń w przekroju belki (linie ciągłe w przypadku początkowego czasu obciążenia momentem zginającym stałym w czasie i równomiernej wilgotności w przekroju; linie przerywane w przypadku długotrwałego czasu obciążenia i nierównomiernego rozkładu wilgotności). Na wykresach widać redystrybucję naprężeń w przekroju: zmniejszenie ich wartości w strefach przy powierzchniowych belki i wzrost w strefach rdzeniowych. Jest to korzystna redystrybucja, biorąc pod uwagę rozkład wytrzymałości drewna w przekroju po wieloletniej eksploatacji (rysunek 1b), natomiast znacząco wzrasta ugięcie belki w czasie.

### Literatura

[1] Rżanicyn A. R.: Teoria pełzania. Moskwa, 1986 r.

Przyjęto do druku: 02.09.2015 r.