

## **WARSTWOWY MODEL ZNISZCZENIA POWŁOK W CZASIE PRZEMIANY WODA-LÓD**

KUBIK Jan

*Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska*

### **LAYER MODEL OF FAILURE IN COATINGS DURING THE WATER-ICE PHASE CHANGE**

A simple model of layer failure in building coatings (like plaster work) was formulated in the paper. Failure was caused by the water-ice phase change, which takes place in capillary tubes of material. In order to find moisture and temperature distributions in a coating, one assumed simple uncoupled equations of moisture diffusion and heat transfer. Next, one considered a situation, in which moisture contents was lower in layers placed at the external surface of a coating than inside and temperature was the lowest outside and grew into the inside of a wall. Then it was pointed out in the paper, that the middle of a coating was a place where ice grew the most intensively and a coating could be easily destroyed there.

### **STRESZCZENIE**

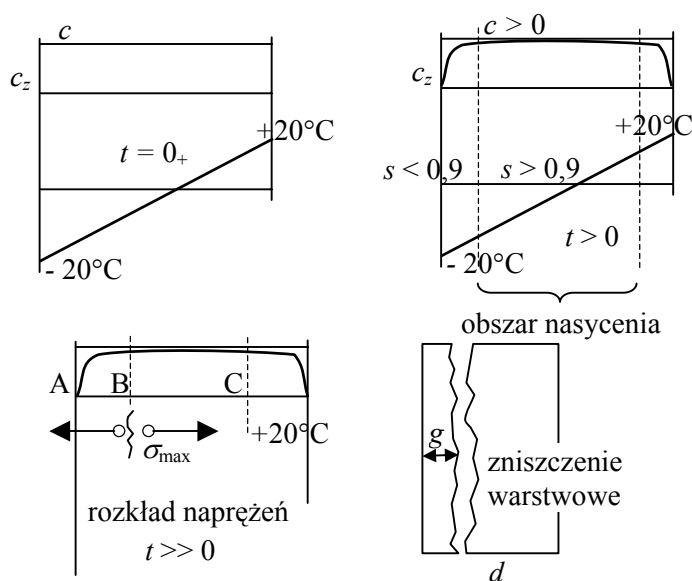
W pracy podano prosty, warstwowy model zniszczenia powłok budowlanych (tynki, powłoki malarskie) w wyniku zamarzania wody w sieci kapilar. Przyjmując proste, niesprężone równanie transportu ciepła i dyfuzji wilgoci, otrzymamy ich rozkłady po grubości ściany. W dalszej kolejności rozważana jest sytuacja, w której w przypowierzchniowych warstwach powłoki będzie mniejsze stężenie wilgoci niż w środku, a temperatura na zewnątrz jest najniższa i rośnie do wnętrza ściany. Wówczas istnieje będzie pośrednie miejsce w powłoce, gdzie najintensywniej narasta lód i gdzie ulega ona łatwo odspojeniu.

### **1. WSTĘP**

Występujące po latach eksploatacji zniszczenia zewnętrznych powłok i tynków budowli zabytkowych posiadają często typowo warstwowy charakter, kiedy to odspojeniu ulega cienka, przypowierzchniowa warstwa materiału o typowej kapilarno - porowatej strukturze. Najczęstszym przejawem tych zniszczeń jest tzw. „głuchy tynk”, kiedy to odspojona od muru warstwa tynku zmienia dźwięk na granicy tynku i szczeliny powstałej w efekcie zniszczenia materiału. Stwierdzona różnica dźwięku między sąsiednimi częściami wyprawy jest najprostszym sposobem oceny warstwowej destrukcji materiału. Powstaje pytanie - dlaczego nie ulega zniszczeniu ciąglemu warstewka bezpośrednio stykająca się z powierzchnią, a odspojeniu ulega warstwa głębiej położona. Praca podaje najprostsze wyjaśnienie tego mechanizmu w przypadku przemiany woda-lód w sieci kapilar.

## 2. ZAMARZANIE WODY W ŚCIANACH

Analizować będziemy przepływ wilgoci przy znanym rozkładzie temperatur w jednorodnym materiale kapilarno - porowatym. W sieci kapilar dochodzi wówczas w określonych miejscach do przemiany fazowej woda-lód [2,3]. Zakładamy, iż na powierzchni zewnętrznej występuje zmienne stężenie wilgoci. Kolejne etapy zniszczenia warstwowego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Warstwowy mechanizm zniszczenia tynku.  
Fig. 1. Layer mechanism of failure in plaster work.

W początkowym stanie mamy prawie pełne zawilgocenie ( $t = 0_+$ ). Po pewnym czasie woda migruje do otoczenia i występuje na powierzchni znaczny jej ubytek. To mniejsze zawilgocenie chroni wyprawę przed rozsądzeniem w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni. Jednakże w strefie prawie pełnego nasycenia i wypełnienie kapilar istnieją warunki do tworzenia się bryłek lodu. Powstają tam zmiany naprężeń, a dalej po zniszczeniu (rozsądzeniu kapilar przez lód) dochodzi do odspojenia wyprawy (rys. 1d).

## 3. MODEL PROCESU

Zawilgoconą przegrodę traktować będziemy jako ośrodek trójskładnikowy (szkielet o gęstości  $\rho_0$ , fazę ciekłą -  $\rho_1$  oraz lód -  $\rho_2$ ). Stosowne są tu parcjalne bilanse masy [1,2,3]

$$\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha) = R^\alpha \quad \text{lub} \quad \rho \frac{dc^\alpha}{dt} + \operatorname{div}(\mathbf{j}^\alpha) = R^\alpha \quad \alpha = 0,1,2 \quad (1)$$

$$\text{gdzie } c^\alpha = \frac{\rho^\alpha}{\rho}, \quad \mathbf{v}^\alpha = \mathbf{w} + \mathbf{u}^\alpha, \quad \rho \mathbf{w} = \sum_{\alpha} \rho^\alpha \mathbf{v}^\alpha, \quad \mathbf{j}^\alpha = \rho^\alpha \mathbf{u}^\alpha$$

Po zsumowaniu bilanse te prowadzą do zasady zachowania masy.

W uproszczonym ujęciu problemu rozkład dyfundującej wilgoci będziemy utożsamiali z ruchem fazy ciekłej  $c_1$ .

Dyfuzję fazy ciekłej  $c_1$  określa układ równań

$$\rho \dot{c}_1 + \operatorname{div} \mathbf{j}_1 = R_1, \quad \mathbf{j}_1 = -D \operatorname{grad} c_1 \quad (2)$$

W jednowymiarowym przypadku szczególnym zachodzi

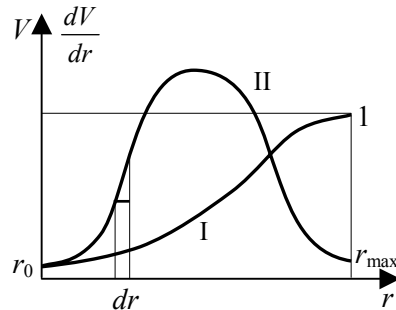
$$\rho \dot{c}_1 = D_1 \frac{\partial^2 c_1}{\partial x_1^2}, \quad c(0_+) = c_0, \quad c(x_1 = 0) = 0, \quad c(x_1 = H) = 0$$

Z rozwiązania równania dyfuzji otrzymamy zmienny w czasie rozkład stężeń ciekłej wody. Z podobnego równania przewodności cieplnej

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} \mathbf{q}, \quad \mathbf{q} = -\lambda \operatorname{grad} T \quad \text{oraz} \quad T(0_+) = T_0, \quad \mathbf{q} = \alpha_T (T - T_0) \mathbf{n} \quad (3)$$

określimy rozkład temperatury  $T$ , uzależniony od strumienia ciepła  $\mathbf{q}$  oraz własności materiału, czyli ciepła właściwego  $c_v$  i współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$ . W tych wstępnych rozważaniach przepływy ciepła i wilgoci traktujemy niezależnie.

Kolejnym zagadnieniem szczegółowym jest stopień wypełnienia kapilar. Znamy tu rozkład średnic kapilar w materiale jako podstawową charakterystykę geometryczną. Oczywiście najbardziej ruchliwe są cząstki cieczy w najszerszych kapilarach, a najbardziej związane w najwęższych. Wynika stąd, iż w pierwszej kolejności wypełniają się najwęższe kapilary. Z drugiej strony w tych wąskich kapilarach przemiana wody w lód zachodzi w niskich temperaturach rzędu  $-25^\circ\text{C}$  (por. [3]).



Rys. 2. Całkowa (I) i różniczkowa (II) krzywa gęstości rozkładu porów.  
 Fig. 2. Integral (I) and differential (II) pores density distribution curve.

Objętość kapilar na jednostkę objętości materiału określa relacja

$$V = \int_{r_0}^{r_m} \frac{dV}{dr} dr \quad (4)$$

natomiast stężenie objętościowe  $c$  zależność

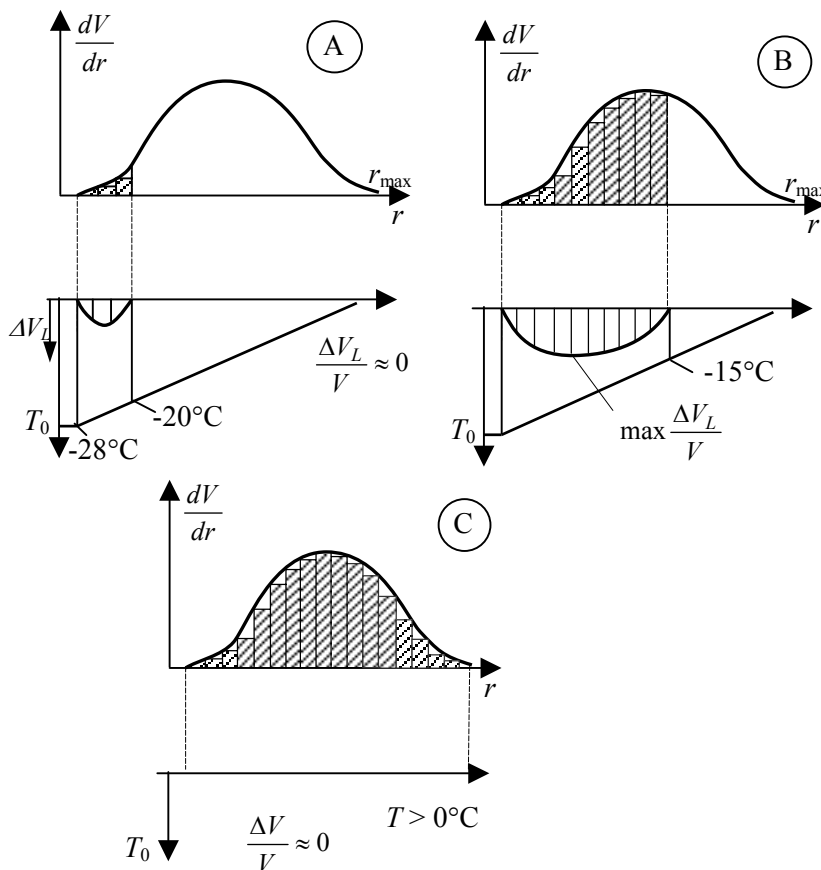
$$c = \int_{r_0}^r \frac{dV}{dr} dr \quad (5)$$

gdzie  $r_0, r, r_m$  są odpowiednio minimalnym promieniem kapilary rzędu  $10^{-8}$ m, aktualnym oraz maksymalnym rzędu  $10^{-4}$ m.

#### 4. KRYSTALIZACJA ŁODU W SIECI KAPILAR

Analiza rozkładów pól temperatur i wilgoci jest wstępnym etapem wyjaśniania warstwowego mechanizmu zniszczeń warstw tynku. Kolejny związany jest z anormalnym procesem krystalizacji lodu w sieci kapilar. Z diagramu różnych form przemian fazowych wody wynika, iż przy rosnącym ciśnieniu woda przechodzi w lód w temperaturach niższych od zera ( $-28 < T < 0^{\circ}\text{C}$ ), przy czym w najwęższych kapilarach zawsze pozostanie w fazie ciekłej, ponieważ tam kryształy lodu mogą powstać tylko przy wysokim ciśnieniu. Przeanalizujemy teraz warunki powstawania lodu w trzech typowych miejscach ściany:

- w zewnętrznej warstwie (A), gdzie panuje najniższa temperatura oraz stosunkowo najmniejsze zawilgocenie
- w warstwie pośredniej (B), przy umiarkowanym zawilgoceniu i temperaturze
- w warstwie środkowej (C), przy dużym zawilgoceniu, ale stosunkowo wysokiej temperaturze



Rys. 3. Wzrost objętości lodu  $\Delta V/V$  w sieci kapilar w częściach: A - na powierzchni zewnętrznej, B - w części przypowierzchniowej, C - we wnętrzu przegrody.  
 Fig. 3. Ice volume growth  $\Delta V/V$  in capillary tubes net: A – on the outer surface of a wall, B- at the outer surface of a wall, C- in the middle of a wall.

W pierwszej kolejności wypełnione są wodą mikrokapilary, a następnie coraz szersze pustki i kapilary. W przypadku (A) słabe wypełnienie cieczą nie powoduje zniszczeń, ponieważ brak wilgoci zdolnej do przemiany fazowej. W przypadku (C) z kolei, mamy duże wypełnienie sieci kapilar, ale ta część znajduje się poza zasięgiem temperatur ujemnych. Natomiast w przypadku pośrednim (B), mamy co prawda wyższą temperaturę niż na brzegu, ale za to dużo wilgoci zdolnej do przemiany w lód. Tam też wystąpią największe naprężenia związane z 9% przyrostem objętości. Widać więc, że zniszczenia wystąpią między powierzchnią a wnętrzem ściany na pewnej grubości  $g$ . Z uwagi na cykliczne powtarzanie się opisanego procesu dochodzi do uszkodzeń w określonej

warstwie muru, znajdującej się w bezpośrednim sąsiedztwie zewnętrznych warstw tynku. Tynk po pewnym czasie odpaja się od podłoża.

Podaliśmy tu jakościowy opis narastania kryształów lodu w materiale, który prowadzi do zniszczeń warstwowych tynków. Pozostaje jeszcze do wyjaśnienia mechaniczny aspekt procesu.

## 5. NAPRĘŻENIA W SIECI KAPILAR

Nie cała wilgoć w kapilarze krystalizuje w formie kryształów lodu. Ilość fazy ciekłej określa wyrażenie  $c(1-s)$ , gdzie  $c$  jest stężeniem wilgoci a  $s$  - wypełnieniem kapilary, rozumianym jako stosunek objętości gazu do cieczy w kapilarze. Dalej dochodzi do 9% ( $\alpha = 0,09$ ) ekspansji kryształów lodu zgodnie z wzorem

$$\varepsilon_{ij}^0 = \alpha c(1-s)\delta_{ij} \quad (6)$$

zmiana objętości wynosi tu  $\varepsilon_{ii}^0 = 3\alpha c(1-s)$ .

Przyjmując z kolei izotropowy materiał i wywołany przez przyrost  $\Delta V$  objętości stan naprężeń  $\sigma_{ij}$  jako izotropowy otrzymamy

$$u_i = Ax_i \rightarrow \varepsilon_{kk} = 3A, \quad \sigma_{ij} = p\delta_{ij} \text{ to stąd } A = \frac{p(1-2\nu)}{E} \quad (7)$$

Przyjmując, że  $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{ii}$ , tj.  $\varepsilon_{ii} = \frac{3p(1-\nu)}{E}$  i  $\varepsilon_{ii} = 3\alpha c(1-s)$  otrzymamy

$$\frac{p(1-\nu)}{E} = \alpha c(1-s) \rightarrow p = \frac{E}{1-\nu} [\alpha c(1-s)] \quad (8)$$

W warstwie, gdzie  $p \geq R_r$ , nastąpi zniszczenie struktury materiału.

Występujący w tych rozważaniach współczynnik rozszerzalności  $\alpha$  jest zależny od temperatury i średnicy kapilar.

## 6. LITERATURA

- [1] BEAUDOIN Y.Y., FELDMAN R.F., ROMACHANDRAN U.S.: Concrete Science, Heyden, London 1981.
- [2] HÄUPL P., XU Y.: Gekoppelter Wärme - und Feuchtetransport in Bauteilen unter Berücksichtigung der Eisbildung, Bauphysik, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1998.
- [3] KUBIK J.: Thermodiffusion flows in a solid with a dominant constituent, Ruhr-Uni IfM 44, Bochum 1985.

- [4] KUBIK J.: Transition from water to ice in building materials, Proc. of 9<sup>th</sup> Symposium for Building Physics and Building Climatology, Dresden 1994.



Prof. dr hab. inż.  
Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa  
e-mail: [kubik@po.opole.pl](mailto:kubik@po.opole.pl)