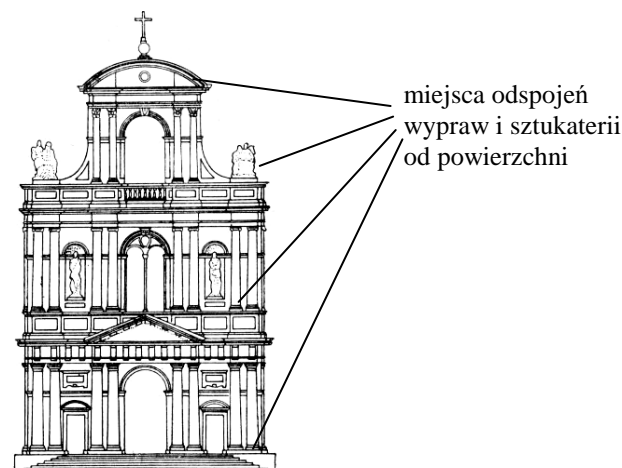


Rozdział V
**WARSTWOWY MODEL ZNISZCZENIA POWŁOK W CZASIE
PRZEMIANY WODA-LÓD**

Wprowadzenie

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 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. Problem ten będzie obecnie opisany. Powstaje po pierwsze pytanie - dlaczego nie ulega zniszczeniu ciąglem 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.

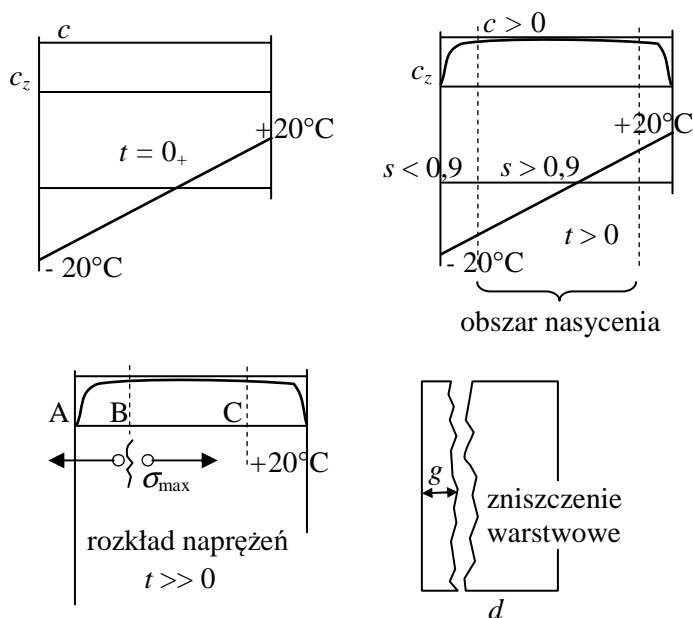


Rys. 1. Kościół St. Gervaise w Paryżu

Zauważmy, iż naszkicowany tu mechanizm zniszczeń występuje w każdej zawilgoconej zewnętrznej powierzchni części zabytku narażonej na działanie mrozu.

1. Zamarzanie wody w ścianach

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



Rys. 2. Warstwowy mechanizm zniszczenia tynku

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 nasączenia i wypełnienia 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. 2d)

2. Model procesu

Zawilgoconą przegrodę traktować będziemy jako ośrodek trójskładnikowy (szkielet o ρ_0 , fazę ciekłą ρ_1 oraz lód ρ_2). Słuszne są tu parcjalne bilanse masy

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

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

Po zsumowaniu bilanse te prowadzą do zasady zachowania masy

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{w}) = 0$$

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

Dyfuzję fazy ciekłej c_1 określa układ równań

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

W jednowymiarowym przypadku szczególnym zachodzi

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

Z rozwiązania równania dyfuzji otrzymamy zmienny w czasie rozkład stężeń ciekłej wody. Kolejną wielkością charakterystyczną jest stopień wypełnienia kapilar s .

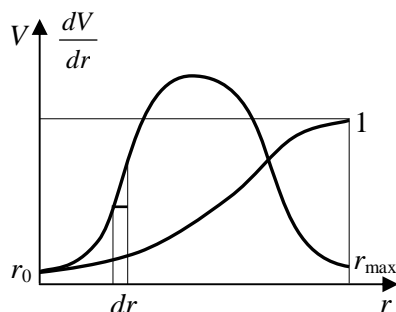
Z podobnego równania przewodności cieplnej

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

określimy rozkład temperatury T , uzależniony od strumienia ciepła q oraz własności materiału, czyli ciepła właściwego c_v i współczynnika przewodności cieplnej λ . 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°C .



Rys. 3. Całkowa i różniczkowa krzywa gęstości rozkładu porów

Objętość kapilar na jednostkę objętości materiału określa relacja

$$V = \int_{r_0}^{r_m} \frac{dV}{dr} dr$$

natomiast stężenie objętościowe c zależność

$$c = \int_{r_0}^r \frac{dV}{dr} dr$$

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

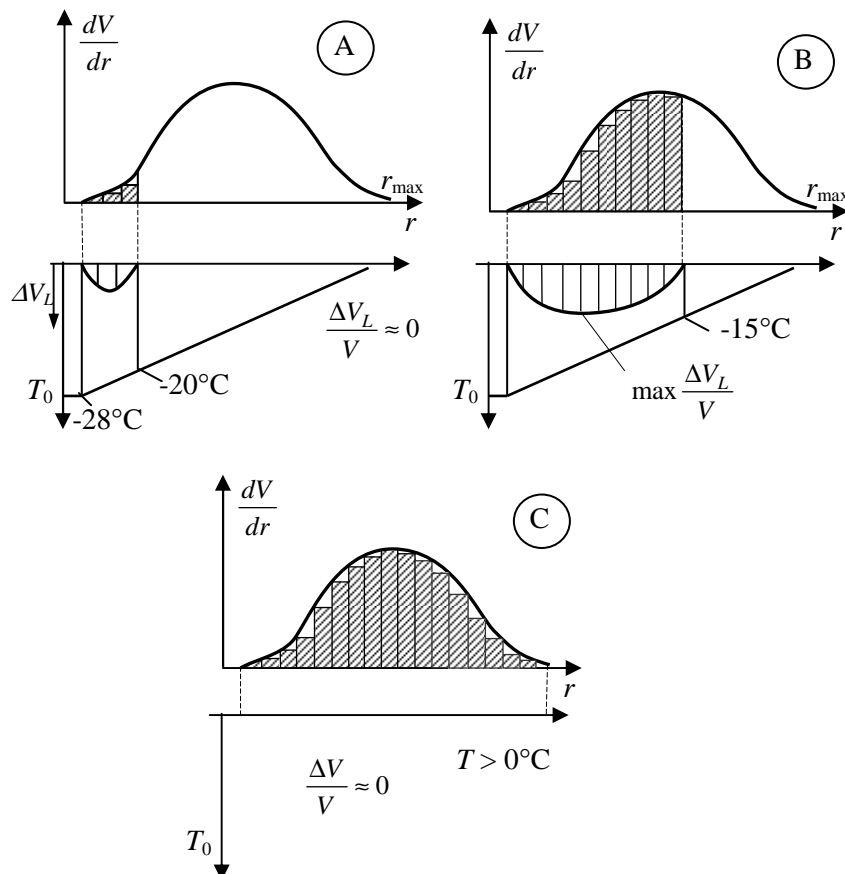
3. Krystalizacja lodu w sieci kapilar

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 największych kapilarach zawsze pozostanie w fazie ciekłej, ponieważ tam kryształki 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

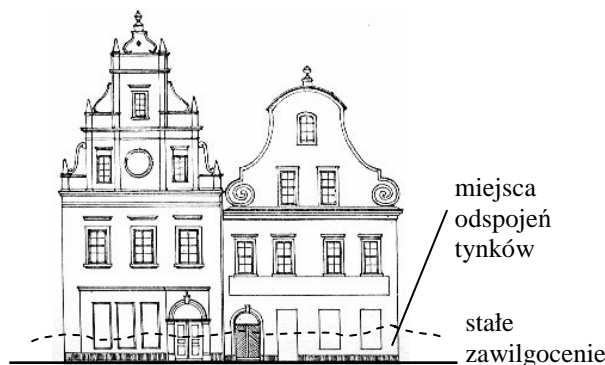
W pierwszej kolejności wypełnione są wodą mikrokapilary, a następnie coraz szersze pustki i kapilary.



Rys. 4. Wzrost objętości lodu $\frac{\Delta V}{V}$ w sieci kapilar w częściach: A - na powierzchni zewnętrznej, B - w części przypowierzchniowej, C - we wnętrzu przegrody

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 odspaja się od podłoża.



Rys. 5. Kłodzko - domy szczytowe

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

4. 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% ekspansji kryształów lodu zgodnie z wzorem

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

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

Przyjmując z kolei izotropowy materiał i wywołany przez przyrost ΔV objętości stan naprężeń σ_{ij} jako izotropowy otrzymamy

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

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

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

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

Występujący w tych rozważaniach współczynnik rozszerzalności α jest zależny od temperatury i średnicy kapilar.

Literatura

- [1] KUBIK J.: Termiczno-wilgotnościowe przyczyny deformacji i zniszczeń budowli, ZN WSI w Opolu, 161, Budownictwo z. 32, 1990, s. 39-48
- [2] KUBIK J.: Problemy fizyki budowli zabytkowych, Materiały Konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej „Fizyka budowli w teorii i praktyce”, Łódź, (współautor Häupl P.), str. 203-208, 1995
- [3] KUBIK J.: Zarysowania ścian ceglanych, ZN WSI w Opolu, 161, Budownictwo z. 32, 1990, s. 69-75