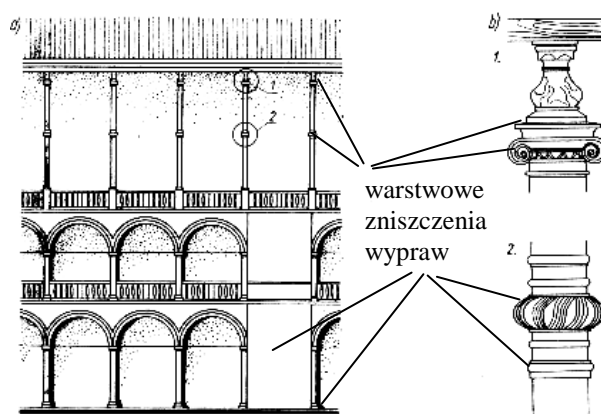


Rozdział VI  
**ROZWÓJ ZNISZCZEŃ POWIERZCHNIOWYCH W  
 ZABYTKOWYCH WYPRAWACH**

**1. Wstęp**

Pokryte malowidłami czy też szlachetnymi wyprawami tynki budowli zabytkowych są przedmiotem szczególnej troski konserwatorów zabytków. Powłoki te w wyniku oddziaływania z otoczeniem ulegają degradacji zarówno w wyniku działania światła, składników agresywnych w powietrzu jak i naprężeń wewnętrznych w powłoce. Szczególne znaczenia nabiera oddziaływanie wilgoci na wyprawy szlachetne i tynki. Generalnie można stwierdzić, iż wilgoć jest przyczyną większości zniszczeń wypraw i zewnętrznych powłok zabytków. Problemy te wystąpiły w szczególnie ostrej formie po powodzi.

Zalana zabytkowa zabudowa miast leżących nad Odrą doznała największych zniszczeń zwłaszcza, iż w budynkach sprzed I wojny światowej brakowało izolacji poziomej, a w pozostałych przypadkach ich jakość była wątpliwa. W tej sytuacji wnikanie wraz z wilgocią rozpuszczonych w niej substancji wpływa szczególnie niekorzystnie na powłoki, a w tym sztukaterie i malowidła w obiektach zabytkowych.

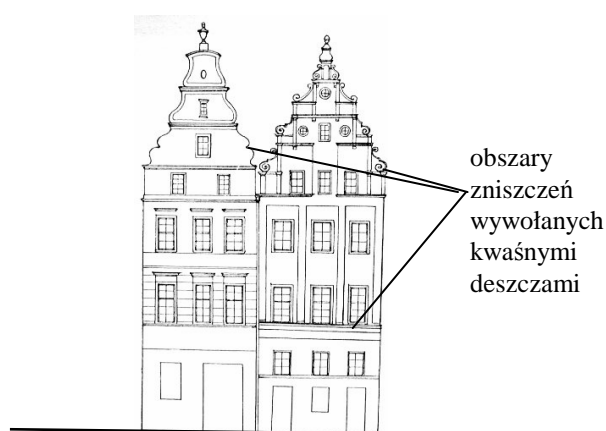


Rys. 1. Fragment krużganka na Wawelu - widok, szczegóły kolumn z miejscami potencjalnych zniszczeń

W poprzednim rozdziale analizowaliśmy warstwowy mechanizm destrukcji wyprawy, kiedy to od powierzchni podłoża odspojona zostaje warstwa tynku. W tym natomiast analizować będziemy inny typ dystorsyjnych naprężeń, których typowym przedstawicielem są naprężenia skurczowe.

Omawiane w tym rozdziale oddziaływania środowiska na powłokę mają złożony fizyko-chemiczny charakter. W każdym jednak przypadku proces ten jest podzielony na kilka etapów a mianowicie:

- wnikania wilgoci wraz ze składnikami agresywnymi do sieci kapilar wyprawy,
- adsorpcja składników na powierzchni kapilary oraz reakcja adsorbentu z materiałem powłoki,
- w efekcie reakcji chemicznej powstawanie produktów osłabiających strukturę materiału lub też wypełniających przestrzeń porów i generujących dystorsyjne stany naprężeń.



Rys. 2. Nysa - domy rynkowe

W wyniku osadzania się produktów w sieci kapilar po jej wypełnieniu powstają trwałe wewnętrzne stany naprężeń rozciągających, które prowadzą do zniszczeń powłoki (por. rys. 2 i 3). Określeniem tych naprężeń zajmiemy się w opracowaniu pomijając inne mniej istotne czynniki determinujące trwałość powłok.

## 2. Przepływy masy w wyprawie

Pierwszy etap procesu destrukcji posiada charakter dyfuzyjny i sprowadza się do opisu dyfuzji roztworów wilgoci wraz ze składnikami agresywnymi w sieci kapilar

Problem ten opisuje układ równań transportu roztworu wody ze środkami agresywnymi w sieci kapilar

$$\begin{aligned}
 \varepsilon \left( \frac{\partial \rho^1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^1 \mathbf{v}^1) \right) &= \rho R^1 && \text{- wilgoć} \\
 (1 - \varepsilon) \left( \frac{\partial \rho^2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^2 \mathbf{v}^2) \right) &= \rho R^2 && \text{- medium agresywne} \\
 (1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho^3}{\partial t} &= \rho R^3 < 0 && \text{- szkielec} \\
 (1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho^4}{\partial t} &= \rho R^4 > 0 && \text{- produkty}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

W powyższych równaniach parcjalnych bilansów masy symbolami

$\rho^\alpha$ ,  $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{v}^\alpha$ ,  $\mathbf{v}^\alpha = \mathbf{w} + \mathbf{u}^\alpha$ ,  $\mathbf{u}^\alpha$ ,  $\mathbf{j}^\alpha = \rho^\alpha \mathbf{u}^\alpha$ ,  $\rho R^\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  oznaczono kolejno gęstość składnika  $\alpha$ , prędkość barycentryczną, parcjálną i dyfuzyjną, strumienie oraz źródła masy i porowatość ośrodka.

Podany układ bilansów parcjalnych po zsumowaniu prowadzi do zasady zachowania masy

$$\varepsilon \dot{\rho}^1 + (1 - \varepsilon) (\dot{\rho}^2 + \dot{\rho}^3 + \dot{\rho}^4) + \operatorname{div}(\rho \mathbf{w}) = 0 \quad \rho \mathbf{w} = -D \operatorname{grad} p \tag{2.2}$$

gdzie

$$\begin{aligned}
 \rho \mathbf{w} &= \rho^1 \mathbf{v}^1 \varepsilon + \rho^2 \mathbf{v}^2 (1 - \varepsilon), && \rho (R^1 + R^2 + R^3 + R^4) = 0, \\
 \varepsilon \rho^1 + (1 - \varepsilon) (\rho^2 + \rho^3 + \rho^4) &= \rho
 \end{aligned}$$

$$c^\alpha = \rho^\alpha / \rho, \quad \alpha = 1, 2, 3, 4 \tag{2.3}$$

Sumując bilanse masy dla dyfundującej wilgoci z medium agresywnym otrzymamy

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho^1 + (1-\varepsilon) \rho^2) + \operatorname{div} \varepsilon (\rho^1 \mathbf{w} + \rho^1 \mathbf{u}^1) + \\ + \operatorname{div} (1-\varepsilon) (\rho^2 \mathbf{w} + \rho^2 \mathbf{u}^2) = \rho (R^1 + R^2) \end{aligned} \quad (2.4)$$

stąd

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} [(\varepsilon \rho^1 + (1-\varepsilon) \rho^2) \mathbf{w}] + \operatorname{div} (\varepsilon \mathbf{j}^1 + (1-\varepsilon) \mathbf{j}^2) = 0$$

Ostatecznie otrzymamy następujące równanie transportu dyfuzyjno-konwekcyjnego w powłoce

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \bar{\rho} \mathbf{w} + \operatorname{div} (\varepsilon \mathbf{j}^1 + (1-\varepsilon) \mathbf{j}^2) = 0 \quad (2.5)$$

uzupełnione o równania fizyczne łączące poszczególne stężenia ze sobą

$$\rho^2 = \rho^2(\rho^1), \quad p = p(\rho^1) \quad (2.6)$$

Do równań tych należy dołączyć równania fizyczne określające strumienie wilgoci  $\mathbf{j}^1$  oraz składników agresywnych  $\mathbf{j}^2$  w niej zawartych jako pole zależne od gradientów stężeń  $c^\alpha$

$$\mathbf{j}^1 = -D^1 \operatorname{grad} c_1, \quad \mathbf{j}^2 = -D^2 \operatorname{grad} c_2, \quad \bar{\rho} \mathbf{w} = -D \operatorname{grad} p$$

Natomiast z rozważań fizyko-chemicznej natury powinniśmy mieć określone źródła masy poszczególnych składników, a w tym i produktów reakcji chemicznych.

W wyniku rozwiązania problemu brzegowego dotyczącego dyfuzji w sieci kapilar uzyskujemy zarówno rozkład stężeń  $c^\alpha$  jak i wartości produktów reakcji  $\rho R^4$  osadzających się w kapilarach, które najczęściej poprzez przyrosty objętości wywołują zniszczenia szkieletu.

Postawiony tu w postaci ogólnej problem dyfuzyjny wymaga badań eksperymentalnych pozwalających na określenie zarówno współczynników dyfuzji jak i wielkości produktów reakcji. Należy podkreślić, że w chwili obecnej jest już rozpoznany proces zmian stężeń oraz narastania produktów korozji w betonie. Uzyskane w tym zakresie wyniki powinny zachęcić do analogicznych badań procesów zniszczeń zachodzących w tynkach, sztukateriach i w wyprawach ścian. Problem ten jest szczególnie palący w

odniesieniu do powłok pokrywających budowle zabytkowe o dużym znaczeniu kulturowym.

### 3. Dystorsje w wyprawach

Procesy migracji wilgoci i mediów agresywnych oraz narastania produktów reakcji wywołują w materiale dodatkowe odkształcenia o charakterze dystorsyjnym. Ich narastanie w czasie procesu wywołuje wewnętrzne stany naprężeń, które po przekroczeniu wytrzymałości wywołują zniszczenia powłoki.

Przyjmując, że materiał wyprawy oraz podłoża jest izotropowy należy się spodziewać następującego pola dystorsji  $\overset{\circ}{\varepsilon}_{ij}$

$$\overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = \alpha T \delta_{ij} = \frac{1}{3} (a_1 c^1 + a_2 c^2 + a_3 \rho R^4) \delta_{ij} \quad (3.1)$$

gdzie  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  są współczynnikami określającymi przyrost objętości ośrodka w wyniku jednostkowego przyrostu stężenia wilgoci ( $c^1$ ), medium agresywnego ( $c^2$ ) oraz produktów reakcji ( $\rho R^4$ ). W przypadku kiedy o zniszczeniu decyduje tylko masa produktów reakcji osadzająca się w kapilarach zachodzi

$$\overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{3} a_3 \rho R^4 \delta_{ij} \quad (3.2)$$

Znajomość pola dystorsji  $\overset{\circ}{\varepsilon}_{ij}$  pozwoli wyznaczyć naprężenia w ciele. Oczywiście  $a_3$  określa zmiany objętości wywołane jednostkowym źródłem  $\rho R^4 = 1$ .

### 4. Naprężenia w podłożu i wyprawie

Analizować będziemy stany naprężeń w układzie trzech warstw sprężystych, o grubościach  $A$ ,  $B$ ,  $C$  które modelować będą stany naprężeń dystorsyjnych wywołane przepływami wilgoci z medium agresywnym oraz narastaniem produktów reakcji w sieci kapilar o rozkładach  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ . W analizowanym układzie występuje płaski stan naprężeń oraz przestrzenny stan odkształceń

wynikających z wpływów dystorsyjnych  $\varepsilon_{ij} = aT \delta_{ij}$ , które są funkcją zmiennych  $x_3$  i  $t$ .

Stany naprężeń w warstwach zewnętrznych (1) oraz w podłożu (2) (por. rys. 4.1.) określają wyrażenia

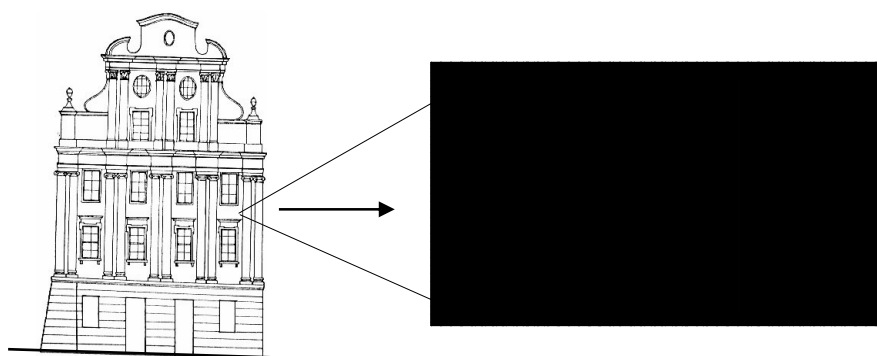
$$\begin{aligned} \sigma_{11}^{(1)} = \sigma_{22}^{(1)} = & -\alpha_1 T^1 K_1 + \frac{1}{2} \left[ \int_A \alpha_1 T_1 K_1 dx_3 + \int_B \alpha_2 T_2 K_2 dx_3 + \right. \\ & \left. + \int_C \alpha_1 T_1 K_1 dx_3 \right] \left( h_2 + h_1 \frac{K_2}{K_1} \right)^{-1} + \frac{3x_3}{2} \left[ \int_A \alpha_1 T_1 K_1 x_3 dx_3 + \right. \\ & \left. + \int_B \alpha_2 T_2 K_2 x_3 dx_3 + \int_C \alpha_1 T_1 K_1 x_3 dx_3 \right] \left[ h^3 + \frac{h_2^3}{8} \left( \frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^{(2)} = \sigma_{22}^{(2)} = & -\alpha_2 T^2 K_2 + \frac{1}{2} \left[ \int_A \alpha_1 T_1 K_1 dx_3 + \int_B \alpha_2 T_2 K_2 dx_3 + \right. \\ & \left. + \int_C \alpha_1 T_1 K_1 dx_3 \right] \frac{K_2}{K_1} \left( h_2 + h_1 \frac{K_2}{K_1} \right)^{-1} + \frac{3x_3}{2} \frac{K_2}{K_1} \left[ \int_A \alpha_1 T_1 K_1 x_3 dx_3 + \right. \\ & \left. + \int_B \alpha_2 T_2 K_2 x_3 dx_3 + \int_C \alpha_1 T_1 K_1 x_3 dx_3 \right] \left[ h^3 + \frac{h_2^3}{8} \left( \frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Podane rozwiązanie wyznacza samorzównoważony stan naprężeń w układzie podłoże-wyprawa wywołany jedynie przyczynami natury dystorsyjnej.

We wzorach tych

$$K_1 = E_1(1 - \nu_1)^{-1}, \quad K_2 = E_2(1 - \nu_2)^{-1} \quad (4.3)$$



Rys. 3. Naprężenia w zewnętrznych warstwach ściany

### 5. Proces destrukcji wyprawy

Podane poprzednio rozważania odnoszą się do ciała sprężystego bez uwzględnienia narastania w czasie zniszczeń materiału. Jedną z najprostszych możliwości uwzględnienia procesów degradacji daje wprowadzenie do rozważań parametru zniszczenia  $\omega$ .

Parametr ten opisuje będzie rozwój w czasie zniszczeń struktury oraz mikrospeknań ( $0 < \omega < 1$ ) od początkowej wartości ( $\omega = 0$ ) po zniszczenie, kiedy  $\omega = 1$ .

Rozwój speknań w materiale opisują równania ewolucji parametru zniszczenia  $\omega$  wraz z warunkami początkowymi

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1(t) &= r_1(\sigma_{11}^{(1)}, T_{(t)}^{(1)}) & \omega_1(0_+) &= 0, & \omega_1(t = t_{kr}^1) &= 1 \\ \dot{\omega}_2(t) &= r_2(\sigma_{22}^{(2)}, T_{(t)}^{(2)}) & \omega_2(0_+) &= 0, & \omega_2(t = t_{kr}^2) &= 1 \end{aligned} \quad (5.1)$$

W równaniach ewolucji (5.1)  $r(\dots)$  jest wyznaczoną doświadczalnie funkcją zależną od naprężeń i pól wywołujących dystorsje w materiale.

Uwzględnienie w rozważaniach postępującej degradacji materiału wyprawy wymaga wprowadzenia w miejsce stałych  $K_1$  i  $K_2$  nowych wielkości

$$K_1^* = E_1(1 - \omega_1)(1 - \nu_1)^{-1}, \quad K_2^* = E_2(1 - \omega_2)(1 - \nu_2)^{-1} \quad (5.2)$$

Po wprowadzeniu stałych  $K_1^*$  i  $K_2^*$  do wzorów na naprężenia uzyskamy szansę na analizę zmian stanu naprężeń w układzie wyprawa-podłoże w wyniku

narastania zniszczeń struktury materiału. Istnieje również szansa na określenie krytycznego czasu po którym rozwój spękań prowadzi będzie do nieodwracalnych zniszczeń w powłoce.

#### LITERATURA

- [1] BOLEY B., WEINER J.: Theory of Thermal Stresses, John Wiley and Sons, New York 1960
- [2] KUSTEN L.: Forschung für den Denkmalschutz, Bundes Ministerium für Forschung und Technologie, Bonn 1994
- [3] RYBICKI R.: Schaden und Mangel an Baukonstruktionen, Werner - Verlag Düsseldorf 1974
- [4] KUBIK J., ZYBURA A.: Prognozowanie trwałości zabezpieczenia betonu powłoką antykorozyjną, XXXIX Konferencja Krynicka, KILiW PAN T.W. 53-60, Krynica 1993