

Zbigniew PERKOWSKI\*  
Politechnika Opolska

## OSŁABIENIE WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW KAPILARNO-POROWATYCH W WYNIKU ZAWILGOCENIA

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono badania szacujące spadek wytrzymałości materiałów kapilarno-porowatych w wyniku nasączenia ich różnymi cieczami - w porównaniu do stanu powietrzno suchego. Jako wytłumaczenie spadków wytrzymałości proponuje się uwzględnienie działania ciśnień rozklinowujących na powierzchniach wewnętrznych materiału, w efekcie którego występuje efekt Rebintera.

## WEAKENING OF STRENGTH OF CAPILLARY-POROUS MATERIALS AS RESULT OF MOISTENING

**Summary.** In the work tests, which estimate decrease of strength of capillary-porous materials saturated by different liquids in comparison to dry material, are presented. Decrease of strength is explained by the action of disjoining pressure on the internal surface of material which causes the Rebinder's effect.

### 1. Wprowadzenie

Typowy dla kapilarno-porowatych materiałów budowlanych duży udział powierzchni wewnętrznej ma istotny wpływ na ich własności. Występujące na tej powierzchni niewysyczone siły powierzchniowe (napięcia powierzchniowe) są przyczyną zachodzenia w tego typu materiałach różnego typu procesów natury fizykochemicznej. Duże znaczenie, z punktu widzenia trwałości materiału, będzie mieć tu niewątpliwie efekt Rebintera [4], który jest związany z adsorpcją cieczy na wewnętrznej powierzchni materiału, powodując jednocześnie jej rozrost. W skali makroskopowej proces ten obserwujemy pośrednio poprzez spadek wytrzymałości materiału. W celu zbadania wpływu polarności cieczy na przebieg procesu przeprowadzono także badania własne, szacujące spadki wytrzymałości zaprawy cementowej w efekcie nasączenia jej wodą i naftą.

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Jan Kubik.

## 2. Efekt Rebintera

Efekt Rebintera jest zjawiskiem natury fizycznej [4]. Polega on na zmniejszeniu się gęstości energii powierzchniowej i tym samym sił napięcia powierzchniowego na brzegu ciała w wyniku adsorpcji substancji powierzchniowo czynnej. W przypadku materiału kapilarno-porowatego będzie on polegał na tworzeniu się polimolekularnych warstw cieczy na ściankach kapilar, mikroszczelin, granicach ziaren. Zmniejszenie się nadmiaru energii zgromadzonej na powierzchni wewnętrznej materiału kapilarno-porowatego powoduje wzrost mikrospełkań, co prowadzi oczywiście do zmniejszenia się jego wytrzymałości.

Powstawanie dodatkowych defektów w strukturze materiału i zmniejszenie się napięcia powierzchniowego można wytłumaczyć istnieniem tzw. ciśnień rozklinowujących - pojęciem, które wprowadził jeszcze w 1939 r. Dieriażyn [2]. Ciśnienie rozklinowujące jest dodatkowym naprężeniem występującym w cieczy w pobliżu granicy fazowej (rys.1). Przeciwdziała ono zmniejszaniu się grubości cienkich warstw cieczy zaadsorbowanych na powierzchni fazy stałej pod wpływem sił zewnętrznych. W stanie równowagi ciśnienie rozklinowujące  $\pi_{ij}$  jest równe różnicy ciśnień na granicy faz i w części objętościowej cieczy

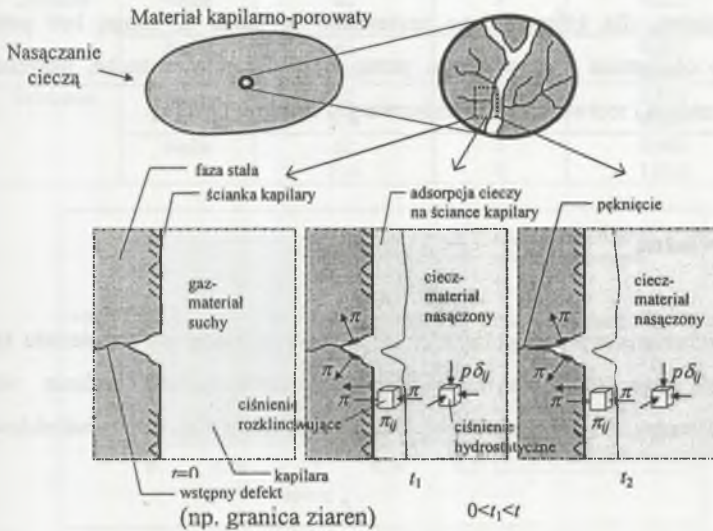
$$\pi_{ij} = \sigma_{ij}^0 - p\delta_{ij}, \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_{ij}^0$  - naprężenie w filmie cieczy w pobliżu granicy z fazą stałą,  $p$  - ciśnienie hydrostatyczne w części objętościowej cieczy,  $\delta_{ij}$  - tensor jednostkowy drugiego rzędu.

Powstanie ciśnień rozklinowujących wynika z własności warstw cieczy przy granicy fazowej. W ogólnym przypadku na charakter tensora  $\pi_{ij}$  wpływają siły powierzchniowe różnej natury. Wyróżnić możemy tu składowe: elektrostatyczną (gdy w zaadsorbowanej warstwie cieczy występują jony, cząstki polarne), molekularną (wynikającą z sił dyspersyjnych oddziaływań podłoża z filmem cieczy), strukturalną (wynikającą ze zmiany struktury zaadsorbowanych warstw cieczy wraz ze zmianą odległości od podłoża), adsorpcyjną (wynikającą ze zmiany stężenia substancji rozpuszczonych w zaadsorbowanych warstwach cieczy wraz ze zmianą odległości od podłoża). Efekty związane z ciśnieniem rozklinowującym wystąpią w wodzie począwszy od odległości mniejszych niż 1000 [°Å]. Choć jest to odległość bardzo mała, to z uwagi na bardzo rozwiniętą powierzchnię wewnętrzną materiałów kapilarno-porowatych, efekty związane z występowaniem zjawisk powierzchniowych nie mogą zostać zaniedbane.

Efekt Rebintera w materiałach kapilarno-porowatych możemy obserwować pośrednio poprzez porównanie wytrzymałości materiału w różnych stanach nasycenia jego porów

badaną cieczą. Przykładowo, w tabeli 1 podano za Pyszniakiem [7] stosunki średnich wytrzymałości na ściskanie betonu zwykłego w stanie pełnego nasycenia wodą  $f_{cm,c}$  i w stanie powietrzno-suchym  $f_{cm,0}$  w zależności od wartości stosunku wodno-cementowego.



Rys. 1. Schemat graficzny efektu Rebintera - działanie ciśnień rozklinowujących  
 Fig. 1. Graphical scheme of the Rebinder's effect - an action of disjoining pressure

Tabela 1

Wpływ pełnego nasycenia wodą na wytrzymałość betonu na ściskanie [7]

w/c	0.7	0.45	0.35	0.18
$f_{cm,c}/f_{cm,0} [-]$	0.925	0.745	0.744	0.775

Tabela 2

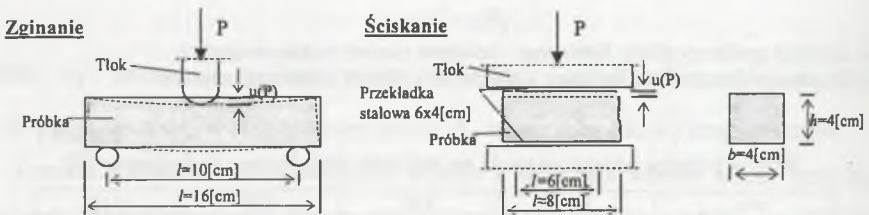
Wpływ pełnego nasycenia wodą i jej roztworami na maksymalne obciążenie przenoszone przez próbki granitowe [8]

Roztwór	Koncentracja jonów (M)	pH	$f_{cm,c}/f_{cm,0} [-]$
NaCl	0.01	2	0.56.8
	0.01	7	0.270
	0.01	9	0.568
	0.01	12	0.432
	1.0	9	0.595
	3.0	9	0.595
CaCl <sub>2</sub>	0.01	2	0.676
	0.01	7	0.243
	0.01	9	0.541
	0.01	12	0.649
	1.0	9	0.324
	3.0	9	0.568
Woda destyl.		7	0.243
Woda rzeczna		7.6	0.378

Należy tu zauważyć, iż badania tego typu w stosunku do betonu mają sens dopiero w warunkach jego eksploatacji, bowiem przed zakończeniem procesu dojrzewania potrzeba zachowania odpowiedniej wilgotności betonu jest bezdyskusyjna. Innym przykładem zmniejszenia się wytrzymałości materiału kapilarno-porowatego pod wpływem wypełnienia jego porów cieczą, dla którego dane zestawiono w tabeli 2, mogą być porównania maksymalnego obciążenia przenieszonego przez próbki granitowe suche, nasycone wodą destylowaną, rzeczną i roztworami o zróżnicowanym stężeniu i pH [8].

### 3. Badania własne

W celu porównania wpływu polarności cieczy wypełniającej pory materiału kapilarno-porowatego na jego cechy wytrzymałościowe przeprowadzono badania własne w laboratorium Katedry Fizyki Materiałów WB PO na maszynie wytrzymałościowej Toni Technik.



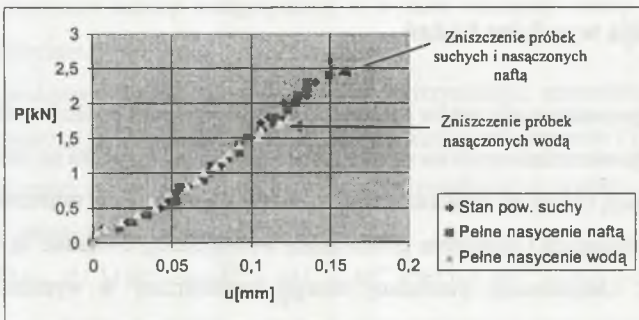
Rys. 2. Schemat badania  
Fig. 2. Scheme of tests

Tabela 3  
Wpływ pełnego nasycenia wodą i naftą na maksymalne obciążenie przenieszone przez próbki z zaprawy cementowej

Typ badania	Ciecz	Wiek próbki [dni]	Liczba prób	Średnia koncentracja masowa cieczy w próbce	$P/P_0$ [-]
Zginanie	Woda	62	3	0.081	0.465
		316	3	0.063	0.705
	Nafta	62	2	0.059	0.956
		316	3	0.040	0.890
Ściskanie	Woda	62	6	0.081	0.518
		316	6	0.063	0.626
	Nafta	62	4	0.059	0.948
		316	6	0.040	0.950

Tabela 4  
Wpływ pełnego nasycenia wodą i naftą na przemieszczenie pod maksymalnym obciążeniem próbek z zaprawy cementowej

Typ badania	Ciecz	Wiek próbki [dni]	Liczba prób	$u_c/u_0$ [-]
Zginanie	Woda	62	3	0.632
		316	3	0.705
	Nafta	62	2	0.969
		316	3	0.900
Ściskanie	Woda	62	6	0.876
		316	6	0.856
	Nafta	62	4	0.968
		316	6	1.010



Rys. 3. Zależność obciążenie-przemieszczenie dla wybranej serii 316-dniowych próbek z zaprawy cementowej suchych i w pełni nasyconych naftą oraz wodą

Fig. 3. Load-displacement dependence for chosen series of cement mortar specimens in 316 day after forming in case of dry material, full water and kerosene saturation

Testom zostały poddane beleczki z zaprawy cementowej o stosunku wody, cementu i piasku w proporcji 1:2:6 (cement CEM II/B-V 32.5 R), wymiarach 40x40x160 mm odpowiednio w stanie powietrzno-suchym, pełnego nasycenia porów wodą (ciecz polarna) i pełnego nasycenia porów naftą (ciecz niepolarna). Wszystkie próbki od momentu zarobienia były przechowywane w wodzie, w temperaturze pokojowej  $20 \pm 4$  [°C], a następnie po ustalonym czasie wysuszone do stałej masy, po czym część została ponownie nasączona wodą lub naftą do stałej masy. Eksperyment przeprowadzono pod kątem zginania i ściskania dla próbek 62-dniowych i 316-dniowych. Próby ściskania prowadzono na połówkach beleczek uzyskanych po ich złamaniu w próbie zginania. Mierzono obciążenie próbki i towarzyszące mu przemieszczenie tłoka według schematu umieszczonego na rysunku 2.

Porównania średnich obciążeń niszczących  $P$  i średnich maksymalnych przemieszczeń tłoka  $u$  uzyskanych w różnych badaniach próbek zestawiono w tabelach 3 i 4. W tabelach tych symbolami  $P_c$ ,  $u_c$ ,  $P_0$ ,  $u_0$  oznaczono odpowiednio obciążenie i przemieszczenie tłoka zmierzone przy badaniu próbek w pełni nasyconych cieczą, oraz w stanie powietrzno suchym.

W wyniku przeprowadzonych prób zauważono, iż nasączenie wodą ma istotny wpływ na spadek rzędu 50% wytrzymałości materiału, jak i granicznego przemieszczenia. Nie stwierdzono natomiast zmian w nachyleniu krzywych opisujących zależności obciążenie-przemieszczenie (rys. 3). Wpływ nasączenia naftą na utratę wytrzymałości i zmianę granicznego przemieszczenia był niewielki i nie przekraczał średnio 5%. Oznacza to, iż polarność cieczy wypełniającej pory materiału kapilarno-porowatego ma istotny wpływ na jego wytrzymałość.

#### 4. Interpretacja wyników badań

Wyniki przeprowadzonych testów omówionych w poprzednim punkcie wskazują na duży wpływ zjawisk powierzchniowych na wytrzymałość materiału. Zjawiska te, utożsamiane tutaj głównie z adsorpcją cieczy na ściankach kapilar, pojawieniem się pola samozrównowagowanych ciśnień rozklinowujących i wzrostem powierzchni wewnętrznej, związane są z przemianami energetycznymi. Oszacowanie przemiany energii wewnętrznej w wyniku adsorbowania cieczy możliwe jest dzięki zmodyfikowanej teorii fluktuacji cieplnych Eyringa-Zurkowa [3], w wyniku której można uzyskać wzór na długowieczność kontaktu  $t_{kr}$  pomiędzy parą sąsiadujących cząstek

$$t_{kr} = t_0 \exp[U / kT], \quad (2)$$

gdzie:  $U$  - bariera energetyczna (energia aktywacji procesu zniszczenia kontaktu),  $k$  - stała Boltzmanna,  $T$  - temperatura,  $t_0$  - stała.

W przypadku jednoosiowego działania stałych naprężeń rozciągających bariera energetyczna ulega obniżeniu [1], a wówczas

$$t_{kr} = t_0 \exp[(U - \Delta U) / kT], \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta U$  - obniżenie bariery energetycznej w wyniku działania naprężeń rozciągających. Odnosząc rozważania do jednostki objętości materiału przy jednoosiowym rozciąganiu otrzymujemy, że

$$\Delta U = \frac{\sigma \epsilon}{2}. \quad (4)$$

Różnice pomiędzy charakterem zniszczenia zaprawy cementowej w zależności od warunków eksperymentu należy upatrywać w budowie żelu cementowego. Cytując za pracą [6], stwierdzamy, iż w żelu cementowym występują kontakty krystaliczne o wytrzymałości rzędu  $10^7$ - $10^6$ [N/kontakt] oraz słabsze koagulacyjne o wytrzymałości rzędu  $10^8$ - $10^7$ [N/kontakt].

Oznacza to, iż o zniszczeniu tego materiału będą decydować przede wszystkim te drugie, gdzie oddziaływanie pomiędzy cząstkami fazy stałej odbywa się za pośrednictwem cienkiego filmu cieczy. Wynika stąd, iż na obniżenie bariery energetycznej decydującej o możliwości zmiany położenia cząstek fazy stałej materiału kapilarno-porowatego w wyniku fluktuacji cieplnych, oprócz naprężeń rozciągających, ma także wpływ adsorpcja cieczy wchodzącej w budowę kontaktu koagulacyjnego. W wyniku takiego rozumowania pierwotny wzór Eryngina-Żurkowa (3) ulegnie kolejnej modyfikacji [5]

$$t_{kr} = t_0 \exp\left[\frac{(U - \Delta U - \Delta U^*)}{kT}\right], \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta U^*$  - obniżenie bariery energetycznej w wyniku adsorpcji cieczy na powierzchni wewnętrznej materiału.

Wówczas na podstawie badań natychmiastowej wytrzymałości materiału nasączonego i suchego (tzn. kiedy  $t_{kr} = 0$ ) oszacować można przez porównanie wzorów (3) i (5) obniżenie bariery energetycznej zniszczenia kontaktu pomiędzy cząstkami w wyniku adsorpcji cieczy na powierzchni wewnętrznej materiału

$$\exp\left[\frac{(U - \Delta U_1)}{kT}\right] = \exp\left[\frac{(U - \Delta U_2 - \Delta U^*)}{kT}\right] \rightarrow \Delta U^* = \Delta U_1 - \Delta U_2, \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta U_1, \Delta U_2$  - obniżenie bariery energetycznej w wyniku działania naprężeń rozciągających przy  $t_{kr} = 0$  odpowiednio w materiale suchym i nasączonym cieczą.

Relacja (6) daje informację jakościową o roli ciśnień rozklinowujących w osłabianiu struktury materiału.

## 5. Podsumowanie

W pracy zaproponowano model osłabienia struktury materiału kapilarno-porowatego jako wynik działania naprężeń rozklinowujących. Wynika stąd, iż procesy sorpcji wilgoci w zasadniczy sposób zmieniają stany naprężeń w przypowierzchniowych warstwach zaadsorbowanej cieczy oraz stykających się z nimi powierzchniami fazy stałej. Zmiany tych naprężeń w określonych warunkach prowadzą do mikrouszkodzeń na powierzchniach wewnętrznych fazy stałej materiału. Adsorpcja cząstek roztworu na powierzchni jest więc jedną z przyczyn uszkodzeń materiału kapilarno-porowatego, a w szczególnych stanach energetycznych, gdy jest to zjawisko dominujące, mówimy wtedy o efekcie Rebintera.

Należy także stwierdzić, iż w przypadkach, kiedy element konstrukcyjny wykonany z materiału kapilarno-porowatego może ulec dużemu zawilgoceniu, fakt ten powinien być uwzględniony w obliczeniach projektowych przez odpowiednie zmniejszenie wytrzymałości materiału.

## LITERATURA

1. Berstein W.A.: Mechano-hydro-litičeskije procesy i pročnost tverdyh tel. Nauka, Leningrad 1987.
2. Dieriagin B.V.: A theory of interaction of particles in presence of elastic double layers. Acta Phys.-Cim. SSSR, vol. 10, 3, 1939, p. 333-346.
3. Eyring H., Ree J.: Theory of non newtonian flow. J. Appl. Phys., 26, 7, 1955, p. 793-809.
4. Jaworski B.M., Piński A.A.: Elementy fizyki. T.I, PWN, Warszawa 1979.
5. Kubik J.: Trwałość materiałów kapilarno-porowatych. Procesy wymiany ciepła i masy w przegrodach budowlanych, Wrocław, 1991, s. 49-57.
6. Kubik J.: Trwałość zaczynów cementowych, XXXVII KN KILiW PAN i KN PZITB, Łódź-Krynica 1991, s. 25-29.
7. Pysznik I.: Wpływ wilgotności betonu na jego wytrzymałość i prędkość fal ultradźwiękowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, 1963.
8. Xia-Ting F., Sili C., Shaojun L.: Effects of water chemistry on microcracking and compressive strength of granite. Int. J. Rock Mech. and Mining Sci, 38, 2001, s. 557-568.

Recenzent: Prof. dr hab.inż. Jerzy Białkiewicz

## Abstract

In the work decrease of strength of capillary-porous materials as result of saturation by different liquids is discussed. Problem is illustrated by experimental tests of strength for concrete, granite and cement mortar. Owing own tests it is also shown that water saturation causes decrease about 50% of compression and tensile strength of cement mortar and kerosene saturation about 5%. As an explanation of phenomenon one proposes occurring of disjoining pressure on the boundaries of solid and liquid phases in pores of material. It develops the internal surface in material causing its weakening (the Rebinders's effect).