

1973

stavebnícky

časopis

6-8

ROČNÍK XXI 1973

Arch.

20 LET PRÁCE ÚSTAVU
TEORETICKÉ A APLIKOVANÉ
MECHANIKY V RÁMCI ČSAV

VYDAVATELSTVO SLOVENSKEJ AKADÉMIE VIED

OB SA H

Úvod	
20 let práce Ústavu teoretické a aplikované mechaniky v rámci ČSAV.	401
Sobotka Z., Plastické přetváření hmot s různými vlastnostmi mechanickými v tahu a v tlaku.	403
Kafka V., Plastické deformace a mikronapjatost z hlediska termodynamiky . . .	418
Sobotková E., Pružnostní charakteristiky ortotropických dvojfázových a trojfázových látek za rovinné napjatosti.	431
Hlaváček M., Pružno-plastické látky se zpevněním při uvažování momentových napětí.	441
Škaloud M., Únosnost a mechanismus zhroucení tenkých stěn namáhaných osamělým břemenem.	452
Kratěna J., Vyšetřování membránových napětí ve stěnách tenkostěnných nosníků v pokritické oblasti pomocí fotoelasticimetrie	466
Bareš R., Javornický J., Navrátil J., Některé základní rysy mechaniky nehomogenních materiálů	478
Berka L., Elastický potenciál a konstitutivní nerovnosti izotropních pevných látek	491
Minster J., Časově proměnná smyková deformace Kelvin—Voigtovy látky . . .	499
Pirner M., Vliv zatížení náhodného charakteru na útlum vlastního pohybu	510
Fischer O., Náprstek J., Účinek pohlcovače kmitání na namáhání konstrukcí. .	519
Náprstek J., Odezva vazkopružného kontinua na vnější harmonické buzení . . .	531
Fiřt V., Vlastní kmitání přetlakových konstrukcí válcovitého tvaru	545
Myslivec A., Práce jako projev síly působící při namáhání smykem	557
Havlíček J., Význam mechanických vlastností nenasyčených zemín.	566
Pruška L., Napětí v překonsolidovaném granulárním poloprostoru	574
Feda J., Rozbor chování několika pilot zatížených vodorovně	582
Kamenov B., Některé problémy nelineární analýzy napětí a deformace zemín. . .	589
Kysela Z., Spolupůsobení sousedních základů	599

СОДЕРЖАНИЕ

Передовая	
Двадцать лет работы Института теоретической и прикладной механики в рамках Чехословацкой академии наук	401
Соботка З., Пластическая деформация материала с разными свойствами при растяжении и в сжатии	415
Кафка В., Пластическая деформация и микронапряженность с точки зрения термодинамики	429
Соботкова Э., Упругостные характеристики ортотропных двухфазовых и трехфазовых материалов при плоском напряженном состоянии	439
Главачек М., Упруго-пластические материалы с упрочнением с учетом моментных напряжений	449
Шкалоуд М., Несущая способность и механизм разрушения тонких стенок нагруженных сосредоточенной нагрузкой	464
Кратена Г., Исследования мембранных напряжений тонкостенных балок в послекритической области при помощи фотоупругости	476

опять в середине между ребрами жесткости. Модели изготовлены с двумя разными толщинами полок, 2 и 10 мм.

Полученные результаты подтвердили выводы испытаний, осуществленных профессором К. Ц. Роки и доцентом М. Шкалоудом в Суонси, Кардиффе и в Праге. Кроме того было доказано, что оптический метод исследования напряжений может с успехом применяться при изучении мембранного напряженного состояния тонких стенок в закритической области.

Замечания и отзывы к этой статье надо послать в трех копиях (не более 2 страниц) редакции журнала до 30. 11. 1973 г., чтобы можно было опубликовать их в номере 4, 1974 г.

Jindřich Kratoňna

PHOTOELASTICITY ANALYSIS OF THE POST-BUCKLED MEMBRANE STRESS STATE IN WEBS OF PLATE GIRDERS

The paper presents a study of post-critical membrane stresses in thin-walled girders, test models having been manufactured of epoxy resin. The method of „freezing“ the models was used. Girders having web panels with $\alpha = 1$ and 2 were studied. In order to study the effect of flange inertia upon the performance of webs, girders with two different flange thicknesses ($t = 2$ and 10 mm) were tested. The panels were subjected to (i) shear, (ii) a concentrated load applied at the middistance of the vertical stiffeners.

The Author's results confirmed the conclusions of the tests carried out by K. C. Rokey and M. Škaloud in Swansea, Cardiff, and Prague. Moreover it was demonstrated that a photoelasticity approach can be successfully used in studying the post-buckled stress state in thin webs.

Discussion of this paper should be sent in triplicate (one discussion not exceeding 2 pages) to the Editor by 30. 11. 1973, to be published in Number 4, 1974 of this Journal.

NĚKTERÉ ZÁKLADNÍ RYSY MECHANIKY NEHOMOGENNÍCH MATERIÁLŮ

RICHARD BAREŠ, JAN JAVORNICKÝ, JAN NAVRÁTIL

1. Strukturální definice složených materiálů

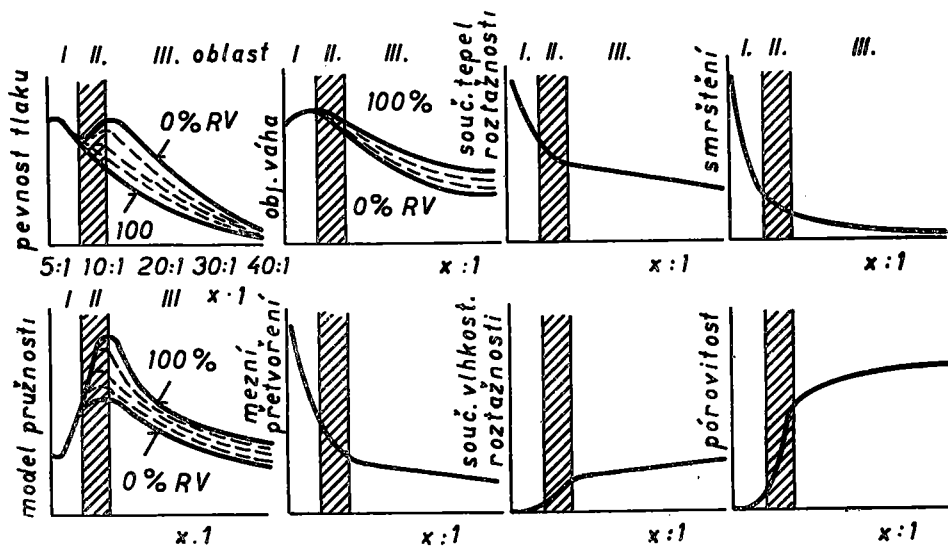
Experimentální údaje vesměs ukazují nápadné kvalitativní odlišnosti vlastností materiálů při různém objemovém podílu těchto fází v systému (obr. 1). Tato zkušenost upozornila na nutnost specifického studia kompositů v několika oddělených oblastech složení.

Brzy bylo nalezeno, že chování makrodispersních materiálů při vnějším namáhání se řídí především podle toho, zda dispergovaná fáze je segregována nebo agregována. U systémů s agregovanou dispergovanou fází pak bezprostředně rozhoduje, je-li dispergující fáze přetržitá či spojitá, jinými slovy, je-li v superstrukturu¹ rozhraní mezi oběma pevnými fázemi uzavřené či otevřené. Především záleží na tom, zda systém obsahuje dostatek dispergující fáze ve formě souvislé matrix.

Na tomto základě lze makrodispersní složené materiály rozdělit — s běžným rizikem zkrácení zjednodušením — do čtyř základních oblastí složení, omezených pěti meznými systémy (obr. 2).

V první oblasti (plněné pojivo) převažuje dispergující pevná fáze *b*, tvořící matrix. Částice dispergovaných fází *a* jsou v matrix segregovány (vzdáleny o více než $2\Delta r$, je-li Δr minimální obalová vrstva částic dispergující fáze), jak ukazuje obr. 2b. Oblast je ohraničena prvním mezným systémem, který neobsahuje žádné dispergované částice, takže superstruktura je totožná s infrastrukturou dispergující fáze (obr. 2a), a druhým mezným systémem, skládajícím se z agregátu dispergovaných částic (vzdálených o $2\Delta r$), doplněného dispergující fází na kompaktní materiál (obr. 2c). V této oblasti není v superstrukturu přítomna tekutá fáze (s výjimkou tekutiny na úrovni vlastní struktury pevných fází).

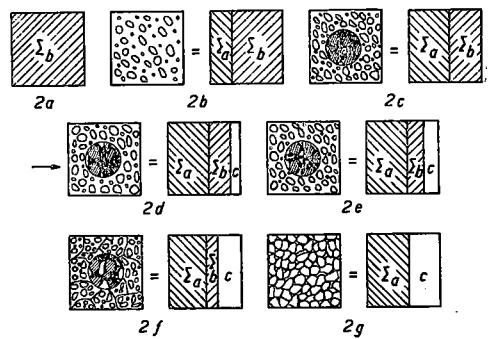
¹ Superstrukturou je míněna struktura systému, na rozdíl od infrastruktur složek (struktur uspořádání fází) a od vlastních struktur jednotlivých fází.



Obr. 1. Schéma závislosti hlavních mechanických vlastností makrodispersních kompozitů na váhovém poměru $x : 1$ dispergované a dispergující fáze.

Рис. 1. Схема зависимостей главных механических свойств макродисперсных композитов от весового отношения $x : 1$ диспергированной и диспергирующей фаз.

Fig. 1. Scheme of relationships of the principal mechanical properties of macro-disperse composite materials to the weight ratio $x : 1$ of the dispersed and dispersing phases.



Obr. 2. Schematické znázornění struktur a složení makrodispersních kompozitů.

Рис. 2. Схематическое изображение структур и составов макродисперсных композиций.

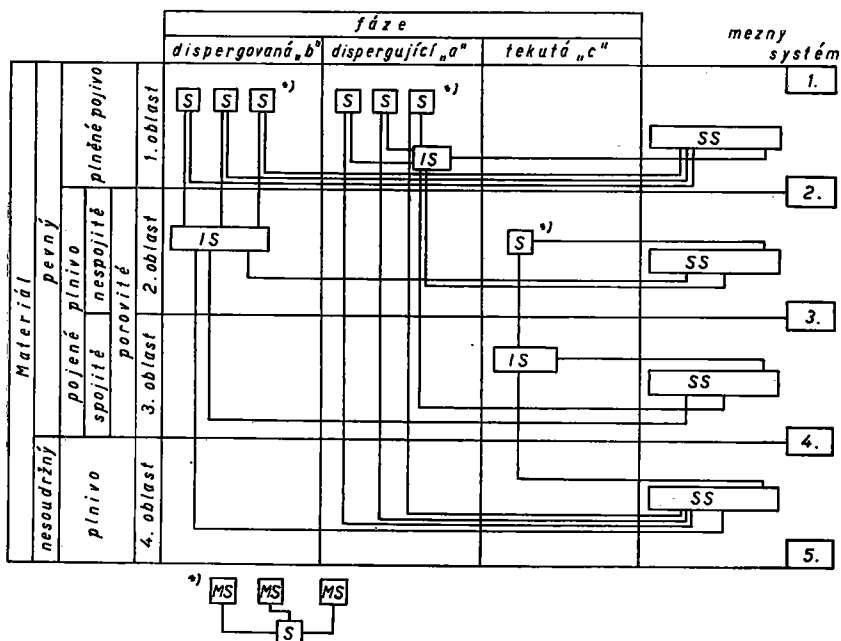
Fig. 2. Schematic representation of structures and compositions of macro-disperse composite materials.

Ve druhé oblasti (pojené plnivo), kde dispergované částice zůstávají agregovány, přistupuje do systému tekutá fáze c , a to na úkor dispergující pevné fáze. V této oblasti, ač poměrně úzké (co do změny složení systému), se vlastnosti systému značně mění. Tekutá fáze se zde vyskytuje nejprve v uzavřených prostorech (obr. 2d). Tyto prostory se posléze spojují, až vytvoří infrastrukturu tekuté fáze; jejím vznikem je dán třetí mezní systém (obr. 2e).

Ve třetí oblasti (opět pojené plnivo) se dále zvětšuje podíl tekuté fáze na úkor fáze dispergující (obr. 2f). Systém je průlinčitý a vzniklá infrastruktura tekuté fáze komunikuje s okolním prostředím. Infrastruktura dispergovaných fází zůstává nadále nezměněna až ke čtvrtému meznímu systému, v němž se v superstruktuře počne nedostávat dispergující fáze ke vzájemnému spojení dispergovaných částic.

Ve čtvrté oblasti se vlivem dalšího úbytku dispergující fáze hustota infrastruktury dispergovaných fází zvyšuje a systém, původně pevný soudržný materiál, se mění v materiál sypký, nesoudržný. Rozšiřováním diskontinuit superstruktura degraduje až na novou infrastrukturu agregovaných částic, dispergovaných pouze v tekuté fázi a tvořících tak zřejmě poslední, pátý mezní systém (obr. 2g).

Schematicky je uvedené rozřídění kompozitů podle složení dané superstruktury znázorněno na obr. 3.



Obr. 3. Klasifikace a složení makrodispersních kompozitů (MS — mikrostruktura látky, S — struktura fáze, IS — infrastruktura složky, SS — superstruktura systému).

Рис. 3. Классификация и состав макродисперсных композитов (MS — микроструктура вещества, S — структура фазы, IS — инфраструктура составляющей, SS — суперструктура системы).

Fig. 3. Classification and composition of macro-disperse composite materials (MS — microstructure of the substance, S — structure of the phase, IS — infrastructure of the component, SS — superstructure of the system).

Všechny mechanické a fyzikální vlastnosti kompositu v určitém čase závisí na: (1) odpovídajících vlastnostech pevných fází, (2) objemovém zastoupení těchto fází v systému, (3) mezerovitosti dispergované fáze, (4) interakci mezi dispergovanou a dispergující fází a (5) interakcí mezi superstrukturou a okolním prostředím.

Kromě toho, pochopitelně, jsou tyto vlastnosti kompositu závislé na časových faktorech, tj. na stáří a historii jednotlivých fází systému a stáří a historii superstruktury, zejména na souslednosti a rychlostech změn okolních fyzikálních a chemických podmínek (vnějšího zatěžování).

Stanovení nejdůležitějších mechanických vlastností materiálů, charakteristik pružnosti, je dále naznačeno pro dva základní druhy kompozitů: kompaktní systém (plněné pojivo v první oblasti) a průlinčitý systém (pojené plnivo v oblasti třetí).

2. Charakteristiky pružnosti kompaktního systému

Při formulaci vztahů pružnostních charakteristik obsažených pevných fází na jedné straně a pevného kompaktního quasihomogenního quasiisotropního systému (typu plněného pojiva) z těchto fází na straně druhé vyšli Dantu [1] a Kaplan [6, 7] ze starších prací Voigta [11] a Reusse [10] a konstatovali, že Youngův modul E dvoufázového systému závisí na Youngových modulech E_1 a E_2 a na objemových podílech P a $(1 - P)$ obou fází podle rovnic 1 a 2:

$$\frac{1}{E} = \frac{P}{E_1} + \frac{1 - P}{E_2}, \quad E = PE_1 + (1 - P)E_2. \quad (1), (2)$$

Těmito rovnicemi byly pro případy zanedbaných nebo nulových Poissonových poměrů omezeny možnosti kombinace modulů fází v modul systému; limitní platnost těchto rovnic prokázal Paul [9] s využitím principů minima přetvárné práce a minima potenciální energie. Extrémní systémy, které se chovají přesně podle horních limitujících rovnic, znázornil Hansen [3, 4] jako vrstevnaté modely s vrstvami obou fází buď kolmými, nebo rovnoběžnými ke směru působícího jednosměrného napětí, které nazval měkkým a tvrdým materiálem.

Jelikož skutečné mechanické chování dvoufázového systému odpovídá kompromisu mezi limitujícími formulacemi, zkombinovali Hirsch [5] a Dougill [2] rovnice 1 a 2 do jednotné rovnice 3:

$$\frac{1}{E} = (1 - A) \left(\frac{P}{E_1} + \frac{1 - P}{E_2} \right) + \frac{A}{PE_1 + (1 - P)E_2}. \quad (3)$$

Experimentální zkoušení betonu vedlo k hodnotě $1/2$ pro empirickou veličinu A ; tato hodnota byla přičítána quasiisotropii reálného materiálu, tj.

stejnému zastoupení materiálů měkkého a tvrdého v reálném. Sluší zde poznamenat, že vzhledem k trojí možné orientaci vrstevnatých modelů by poslední důvod vedl pro A k hodnotě $2/3$.

Naším [8] prvním krokem bylo objektivizovat mimoempirickou cestou s využitím principu minima přetvárné práce tvrzení, že pružná poddajnost reálného materiálu (tj. převrácená hodnota Youngova modulu pružnosti) je aritmetickým průměrem poddajností tohoto systému, chovajícího se jednou jako měkký, jednou jako tvrdý materiál.

Dalším nutným krokem se stalo rozšíření koncepce vrstevnatých modelů. Za měkký materiál nadále pokládáme systém s homogenní hustotou napětového toku, v němž dochází ke všem kluzům, což se projevuje nulovými smykovými napětími a ortogonálním přetvárným chováním takového systému. Za tvrdý materiál je pak pokládán systém s homogenní hustotou přetvoření, v němž je naopak všem kluzům zabráněno, což vyvolává nekonečně velká smyková napětí, avšak vede opět k ortogonálnímu přetvárnému chování tohoto systému.

Představuje-li každé pružné chování reálného materiálu kompromis mezi oběma extrémami, může být uvažováno rovněž jako ortogonální, což umožňuje formulovat s přihlédnutím k Poissonovým poměrům μ_1 a μ_2 jednotlivých fází vztahy $H-D-N$ pro modul pružnosti E a Poissonův poměr μ kompaktního dvoufázového systému rovnicemi 4 a 5:

$$E = \frac{2}{B} E_1 E_2 C, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{1}{B} \left\{ \left[\begin{array}{l} \mu_2(1-P)E_1 \\ + \mu_1 P E_2 \end{array} \right] C + E_1 E_2 \left[\begin{array}{l} \mu_1(1+\mu_2)(1-2\mu_2)P E_1 + \\ \mu_2(1+\mu_1)(1-2\mu_1)(1-P)E_2 \end{array} \right] \right\}, \quad (5)$$

kde

$$B = \left[\begin{array}{l} (1-P)E_1 \\ + P E_2 \end{array} \right] C + E_1 E_2 \left[\begin{array}{l} (1+\mu_2)(1-2\mu_2)P E_1 + \\ (1+\mu_1)(1-2\mu_1)(1-P)E_2 \end{array} \right]$$

a

$$C = \left[\begin{array}{l} (1+\mu_2)P E_1 + \\ (1+\mu_1)(1-P)E_2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} (1-2\mu_2)P E_1 + \\ (1-2\mu_1)(1-P)E_2 \end{array} \right].$$

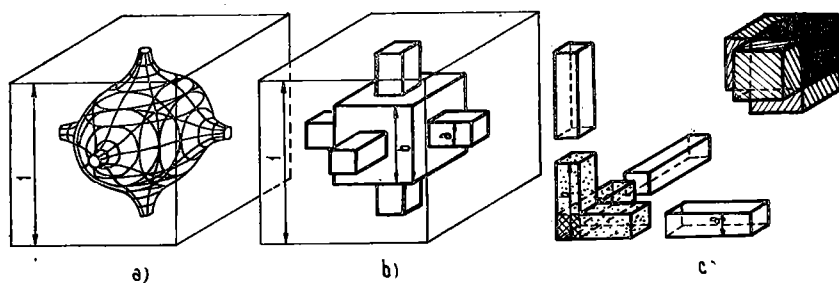
3. Charakteristiky pružnosti systému průlinčitého

Přes jejich nezávislost na uspořádání fází v kompaktním systému ztrácí uvedené vztahy svůj význam v případě uprázdnění objemu jedné fáze; plat-

nost těchto vztahů nelze žádným způsobem přímo rozšířit na porézní quasi-homogenní quasiisotropní systém.

Běžné porézní materiály je však možno rozdělit v soulase s jejich morfologií na dvě hlavní skupiny. Každá z těchto skupin je reprezentována reálným materiálem se zjednodušenou strukturou buď pěnového typu, nebo typu pojeného plniva. Tímto zjednodušením je minimalizován počet druhů strukturních elementů ortogonálního tvaru v pevném skeletu takového materiálu, jakož i počet nezbytných rozměrových údajů. Jelikož se strukturní elementy jednoho druhu vyznačují specifickým mechanickým chováním, vzniká pak možnost pojednávat vlastnosti porézního systému z quasifázového hlediska — jako systému, jehož fázemi jsou množiny strukturních elementů jednotlivých druhů.

Při studiu quasihomogenních quasiisotropních makrodispersních složených materiálů v celém oboru složení byla hlavní pozornost přirozeně soustředěna na reálný spojité porézní systém typu pojeného plniva (obr. 4a až 4c). Přijaté



Obr. 4. a) Objemová jednotka průlinčitého materiálu typu pojeného plniva. b) Objemová jednotka zjednodušená na reálný systém. c) Zjednodušená jednotka rozdělená na strukturní elementy (elementy téhož druhu stejně graficky pojednány).

Рис. 4. а) Единица объема пористого материала типа связанного заполнителя. б) Единица объема упрощенная на реальную систему. в) Упрощенная единица разделенная на структурные элементы (элементы того же вида графически обозначены равным образом).

Fig. 4. a. Volume unit of permeable material of the bond filler type. b. Volume unit simplified in the real system. c. Simplified unit divided into participant structural elements (elements of the same kind are graphically unified).

přístup nám umožnil formulovat rovnicemi 6 až 8 vztahy pro Youngův modul E_0 a Poissonův poměr μ_0 při vnějším zatížení, jakož i pro objemový modul K_{in} při působení pouze vnitřního přetlaku, charakterizující průlinčitý systém typu pojeného plniva v suchém stavu. Tyto veličiny závisí na pružnostních charakteristikách E a μ homogenního a isotropního pevného materiálu, tvoří-

cího skelet systému, a na relativních rozměrech a a b strukturních elementů vzhledem k systému.

$$\underline{E}_0 = \frac{6}{D} a^2 E; \quad \underline{\mu}_0 = \frac{1}{D} (3a\mu + H + J), \quad (6), (7)$$

$$K_{in} = \frac{2}{2 - F} \frac{E}{3(1 - 2\mu)}, \quad (8)$$

kde

$$D = 3 \left[1 + (1 - b) \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \right] - H + 2J,$$

$$F = \frac{1}{1 - 2\mu} \left[1 - 2a\mu + (1 - b) \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} - H \right],$$

$$H = (1 - 2\mu) \left\{ \frac{a(b - a)}{b} M + \left[(1 - b) \frac{2\mu}{1 - \mu} - a \right] Q \right\},$$

$$J = (1 + \mu) \left\{ \frac{a(b - a)}{b} N + \left[(1 - b) \frac{\mu}{1 - \mu} + a \right] R \right\},$$

$$M = \frac{a(1 + \mu) - 2b\mu Q}{2a\mu - b(1 + \mu)},$$

$$N = \frac{a(1 - 2\mu) + b\mu R}{a\mu + b(1 - 2\mu)},$$

$$Q = \frac{a^2 b(1 - \mu)^2 + 2a\mu(1 - b)[2a\mu - b(1 + \mu)]}{b^3(1 - \mu)^2 - 2a(1 - 2\mu)(1 - b)[2a\mu - b(1 + \mu)]},$$

$$R = \frac{a^2 b(1 - \mu)^2 + a\mu(1 - b)[a\mu + b(1 - 2\mu)]}{b^3(1 - \mu)^2 + a(2 - \mu)(1 - b)[a\mu + b(1 - 2\mu)]}.$$

U většiny průlinčitých systémů typu pojeného plniva mohou být jako pružnostní charakteristiky E a μ ve výše uvedených rovnicích 6 až 8 použity hodnoty získané z rovnic 4 a 5. Pokud se týká strukturních rozměrů a a b , ukázalo se naprosto vyhovujícím použití výsledků, získaných z rovnic 9 a 10, kde P je objemové zastoupení dispergující fáze v úhrnu pevných fází (pojiva v pevném skeletu) a V_s znamená objemový podíl pevného skeletu na celém spojitě porézním systému:

$$a = \sqrt{\frac{PV_s}{3(1-b)}}, \quad (9)$$

$$b = \sqrt[3]{(1-P)V_s}. \quad (10)$$

Bylo konstatováno, že význam výše uvedených vztahů, týkajících se pružnostních charakteristik reálného průlinčitého systému typu pojeného plniva, je omezen na materiály v suchém stavu. Opakem suchého materiálu je materiál, jehož volný vnitřní objem je nevratně zaplněn tekutinou, zcela tam upoutanou působením vnitřních povrchových sil. K účelu formulace vztahů pro charakteristiky pružnosti takového systému se ukázal užitečným návrat k rovnicím 1 a 2, resp. k jejich $H-I-N$ analogům 11 až 14, kde E_m a μ_m značí Youngův modul a Poissonův poměr měkkého materiálu, E_i a μ_i obdobné charakteristiky materiálu tvrdého:

$$\frac{1}{E_m} = \frac{P}{E_1} + \frac{1-P}{E_2}, \quad (11)$$

$$\mu_m = \frac{\mu_1 P E_2 + \mu_2 (1-P) E_1}{P E_2 + (1-P) E_1}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{E_i} = \frac{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2) P E_1 + (1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)(1 - P) E_2}{[(1 + \mu_2) P E_1 + (1 + \mu_1)(1 - P) E_2][(1 - 2\mu_2) P E_1 + (1 - 2\mu_1)(1 - P) E_2]}, \quad (13)$$

$$\mu_i = \frac{\mu_1(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2) P E_1 + \mu_2(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)(1 - P) E_2}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2) P E_1 + (1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)(1 - P) E_2}. \quad (14)$$

Jelikož mezi prázdnou fází a skeletem může v suchém systému vzniknout pouze měkké spojení, lze charakteristiky pružnosti E_{f0} a μ_{f0} této prázdné fáze obdržet z rovnic 11 a 12:

$$E_{f0} = \frac{(1 - V_s) E E_0}{E - E_0}, \quad (15)$$

$$\mu_{f0} = \frac{\mu_0 E - \mu E_0}{E - E_0}.$$

Nevratnost zaplnění vnitřního objemu průlinčitého systému tekutinou může být zaručena pouze při čistě tvrdých interakcích jak mezi volným vnitřním objemem a tekutinou v něm obsaženou, tak i mezi infrastrukturou tekutiny a pevným skeletem systému. Je-li tekutinou kapalina charakterizovaná objemovým modulem K_l , vede opakované použití rovnic 13 a 14 zprvu k charak-

teristikám pružnosti E_f a μ_f kapaliné infrastruktury a posléze k charakteristikám E a μ systému krajně nesuchého:

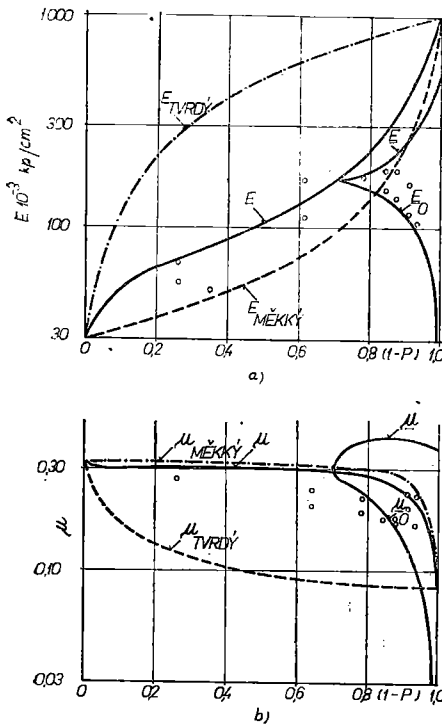
$$E_f = E_{f0} \frac{E_{f0} + 3(1 - 2\mu_{f0})K_l}{E_{f0} + 2(1 + \mu_{f0})(1 - 2\mu_{f0})K_l}, \quad (17)$$

$$\mu_f = \frac{\mu_{f0}E_{f0} + (1 + \mu_{f0})(1 - 2\mu_{f0})K_l}{E_{f0} + 2(1 + \mu_{f0})(1 - 2\mu_{f0})K_l}, \quad (18)$$

$$\underline{E} = \frac{[(1 + \mu_f)V_s^2 E + (1 + \mu)(1 - V_s)E_f][(1 - 2\mu_f)V_s^2 E + (1 - 2\mu)(1 - V_s)E_f]}{(1 + \mu_f)(1 - 2\mu_f)V_s^2 E + (1 + \mu)(1 - 2\mu)(1 - V_s)E_f}, \quad (19)$$

$$\underline{\mu} = \frac{\mu(1 + \mu_f)(1 - 2\mu_f)V_s^2 E + \mu_f(1 + \mu)(1 - 2\mu)(1 - V_s)E_f}{(1 + \mu_f)(1 - 2\mu_f)V_s^2 E + (1 + \mu)(1 - 2\mu)(1 - V_s)E_f}. \quad (20)$$

Youngovy moduly E_0 , E a Poissonovy poměry μ_0 , μ reálného spojitě porézního systému typu pojeného plniva, a to jednak suchého (s prázdným vnitřním objemem), jednak nevratně zaplněného kapalinou, představují extrémní hodnoty charakteristik pružnosti tohoto systému. Hodnoty, charakterizující



Obr. 5. Závislost a) Youngova modulu E a b) Poissonova poměru μ makrodispersního složeného materiálu na objemovém zastoupení $(1-P)$ dispergovaných částic v úhrnu pevných fází ve srovnání s experimentálně získanými hodnotami odpovídajících charakteristik typických plastbetonů. Рис. 5. Зависимость а) модуля Юнга E и б) отношения Пуассона μ макродисперсного композиционного материала от объемного содержания $(1-P)$ диспергированных частиц в общей сумме прочных фаз по сравнению с полученными экспериментальным путем значениями соответствующих характеристик типичных пластбетонов.

Fig. 5. Dependence of a) Young's modulus E and b) Poisson's ratio μ of the macro-disperse composite material on the dispersed particles volume share $(1-P)$ in the total solid compared with experimental values of the said parameters of typical resin-concretes.

pružné chování vlhkých složených materiálů typu pojeného plniva, leží mezi uvedenými extrémními hodnotami.

Naznačené vztahy lze vyjádřit průběhem křivek pružnostních charakteristik makrodispersního kompositu v celém oboru objemového zastoupení dispergovaných částic v úhrnu pevných fází systému. Počítačové zpracování podkladů umožňuje vynesení takových křivek pro libovolnou kombinaci Youngových modulů a Poissonových poměrů pevných fází v systému zastoupených a porovnání s experimentálně získanými hodnotami charakteristik pružnosti konkrétních materiálů (obr. 5a a 5b).

4. Elastance materiálu

Obecně je pružnost materiálu funkcí času a předchozí vztahy platí přesně vzato jen v počátečním čase historie systému i fází, nebo, jsou-li charakteristiky pružnosti složek materiálu známy v libovolném čase, pro případ nulového času historie kompositu, kdy se začíná uplatňovat např. časová změna kontaktních napětí (na mezifázových rozhraních). V tomto smyslu lze hodnoty, získané výpočtem podle uvedených vztahů, považovat za základní (prvotní, výchozí) pružnostní charakteristiky materiálu.

Časová podmíněnost pružnosti i jiných vlastností materiálu ukazuje, že pro objektivní hodnocení materiálu je nutno nalézt a definovat novou charakteristiku, vycházející z energetického stavu systému. Takovému nároku vyhovuje elastance, tj. schopnost materiálu být pružným v libovolném stadiu jeho existence. Tuto schopnost materiál postupně ztrácí, je vyčerpávána jeho namáháním (opakovaným nebo dlouhodobým zatížením, změnami teploty, vlhkosti apod.). Z tohoto hlediska je možno elastanci chápat jako základní kvalitativní charakteristiku pružnosti.

Ke kvantitativnímu popisu slouží zavedená míra elastance materiálu, nová veličina nazvaná absorbent pružnosti A , jež je funkcí složení (definice) materiálu M a jeho historie H , zahrnující časový vliv teploty, směru a způsobu zatížení, vnitřní napjatosti atd.:

$$A = f(M, H).$$

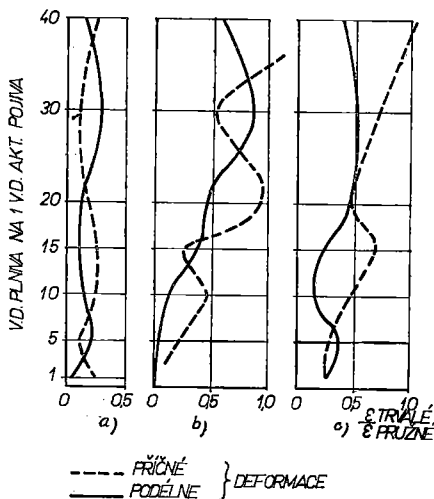
Z předcházejících kapitol vyplývá vzájemná závislost složení kompositu a jeho konvenčních pružnostních charakteristik E a μ , lze tedy psát rovněž:

$$A = F(E, \mu), H.$$

V uvedeném smyslu náleží každému definovanému materiálu v určitém čase jediný absorbent pružnosti. Jeho maximální využitelná hodnota odpovídá celkové energetické spotřebě na porušení, možné za daných termodynamických

podmínek (destrukční, dehezní energii). Materiál namáhaný beze změny struktury nebo porušený se vyznačuje nižší hodnotou absorpce pružnosti (menší využitelnou energetickou rezervou), úplně rozrušený materiál má absorpce pružnosti nulový.

Použijeme-li jako praktického měřítka pružnosti materiálu např. poměru trvalých a pružných deformací a sledujeme-li současně příčné a podélné deformace systému při jednoosém namáhání, potvrzuje se, že kompozity různého složení mají sice odlišný, avšak nepřekročitelný absorpce pružnosti. Zvětšené složce lineární elastance v podélném směru odpovídá zmenšení složky lineární elastance ve směru příčném a naopak (obr. 6). Materiál se chová, jako by při



Obr. 6. Poměr přetvoření $\epsilon_{trvalé}$ k $\epsilon_{pružné}$ v axiálním (plná čára) a příčném (přerušovaná čára) směru při napětí rovném 1/3 pevnosti v závislosti na váhovém poměru dispergované a dispergující fáze pro a) epoxidový plastbeton b) polyesterový plastbeton c) furanový plastbeton.

Рис. 6. Отношение деформации остаточное к $\epsilon_{упругое}$ в продольном (полная линия) и поперечном (штриховая линия) направлениях при напряжении равном 1/3 прочности в зависимости от весового отношения диспергированной и диспергирующей фаз для а) эпоксидного пластбетона, б) полиэфирного пластбетона, в) фуранового пластбетона.

Fig. 6. Ratio of strains $\epsilon_{permanent}$ to $\epsilon_{elastic}$ in axial (full line) and lateral (dashed line) directions, respectively (for stress equal to 1/3 of strength) in dependence on the dispersed to the dispersing phases weight ratio for a) epoxide resin concrete, b) polyester resin concrete, c) furanic resin concrete.

určitém namáhání mohl absorbovat jen jisté množství energie, vyjádřené zde velikostí trvalých deformací. Toto množství může být během přetváření absorbováno někdy přednostně v podélném směru, jindy ve směru příčném; absorpce pružnosti materiálu je však vždy snížena, jeho elastance se zmenšuje.

Lze předpokládat, že absorpce pružnosti je funkcí všech konvenčních materiálových charakteristik a může se stát i základem jejich popisu; především pevnosti materiálu úzce souvisí s jeho energetickou rezervou, vyjádřenou absorpcentem pružnosti. Funkcionální analýza této veličiny a jejích vztahů ke konvenčním materiálovým charakteristikám nepochybně vyžaduje další

práce; perspektiva možnosti popisu vlastností každého materiálu pomocí jedné veličiny je nicméně nadmíru přitažlivá.

5. Závěr

Autoři poukázali na nezbytnost studia makrodispersních kompozitů v závislosti na podílu dispergovaných, dispergujících a tekutých fází v systému. Formulovali (funkcionálně vyjádřili) vztahy charakteristik pružnosti kompaktního systému (plněného pojiva) a průlinčitého systému (pojeného plniva) k pružnostním charakteristikám a objemovému zastoupení fází. Naznačili možnost popsat vlastnosti materiálu jedinou obecnou funkcí jeho definice (složení) a jeho historie, absorbentem pružnosti.

LITERATURA

1. DANTU, P.: Étude des contraintes dans les milieux hétérogènes. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Publ. No 57-6, Paris 1957. — 2. DOUGILL, J. W.: ACI Jour., 58, 1962, 1363. — 3. HANSEN, T. C.: Creep of Concrete. Bull. No 33, Swedish Cem. and Concr. Res. Inst., Stockholm 1958. — 4. HANSEN, T. C.: The Structure of Concrete. Cement and Concrete Association, London 1968. — 5. HIRSCH, T. J.: ACI Jour., 59, 1962, 427. — 6. KAPLAN, M. F.: ACI Jour., 55, 1959, 1193. — 7. KAPLAN, M. F.: Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio and the Strength of Concrete, RILEM, Paris 1959. — 8. NAVRÁTIL, J.: Mechanika spojitě porézních soustav v definovaných podmínkách prostředí. [Závěrečná zpráva.] Praha, ÚTAM-ČSAV, 1968. — 9. PAUL, B.: Trans. Metallurgical Soc. AIME. 36, 1960, 218. — 10. REUSS, A.: ZAMM, 9, 1929, 49. — 11. VOIGT, W.: Lehrbuch der Krystalphysik. Teubner, Berlin 1910. —

Diskusní příspěvky k tomuto článku (v rozsahu nejvíce 2 stran) pošlete trojmo redakci časopisu do 30. 11. 1973, aby chom je mohli uveřejnit v čísle 4, 1974.

Рихард Бареш, Ян Яворницкы, Ян Навратил

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ МЕХАНИКИ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Стремление набросать схему физически обоснованной теории деформации и разрушения неоднородных материалов параллельно к развитию методов рациональной механики вязано к подходу, основанному на общих чертах композиционных материалов с диспергированными частицами. Основными чертами этих материалов как систем являются структура и присутствие внутренних мезофазовых границ, которые вместе являются главными определяющими факторами их свойств. Изменяется-ли отно-

сительный объем отдельных фаз системы, выразительно изменяются и оба фактора и можно ограничить несколько областей состава композитов для определения свойств материалов.

Главными механическими свойствами материалов безусловно являются характеристики их упругости. Выявление подходящих структуральных моделей композитов позволяет становление их характеристики упругости помощью подходящей комбинации характеристик составляющих. Бесспорная зависимость свойств материалов от времени и теоретические осложнения, вызванные несоизмеримостью традиционных материальных постоянных, требуют далее введения энергетически понимаемой характеристической функции материала. Специфическое влияние внутренних пределов, границ, на свойства материалов будет рассматриваться в другом случае.

Замечания и отзывы к этой статье надо послать в трех копиях (не более 2 страниц) редакции журнала до 30. 11. 1973 г., чтобы можно было опубликовать их в номере 4, 1974 г.

Richard Bareš, Jan Javornický, Jan Navrátil

SOME BASIC FEATURES IN MECHANICS OF INHOMOGENEOUS MATERIALS

The effort to develop a physically justified theory of deformative and destructive process in inhomogeneous materials simultaneously with the methods of rational mechanics depends on the approach based on common features of composite materials with dispersed particles. The fundamental features of these materials as systems are their structure and the presence of internal interphase boundaries which together are the main determining factors of their properties. Both these factors vary significantly, if the volume shares of individual phases in the system are changed, and several ranges of composition can be determined in order to obtain the properties of the material.

The principal mechanical properties of the materials are undoubtedly the parameters of their elasticity. Suitable structural models of the composite materials were found, allowing to determine their elasticity parameters by means of a proper combination of the components parameters. The dependence of the properties of the materials on time and theoretical complications due to incommensurability of conventional material constants call for the introduction of an energetically conceived characteristic function of the material. The specific influence of internal interphase boundaries on the properties of materials will be discussed on another occasion.

Discussion of this paper should be sent in triplicate (one discussion not exceeding 2 pages) the Editor by 30. 11. 1973, to be published in Number 4, 1974 of this Journal.