

Československá společnost pro mechaniku při ČSAV

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Texty přednášek ze semináře "Kompozitní materiály", pořádaného ČSSM ve spolupráci s pobočkami ČVTS ÚTAM a UT ve dnech 19. 2. a 19. 3. 1981

Pod vědeckou redakcí akademika J. Němce

Vydala
Československá společnost pro mechaniku při ČSAV
Praha, červen 1981

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY GRANULOVANÉHO TYPU

Richard A. Baroš

Zopakujme si nejdříve některá základní fakta, o kterých jsem se zmínil ve své úvodní přednášce.

Až do nedávné doby byly kompozity považovány za prostou kombinaci dvou nebo více materiálů; ve skutečnosti každá kombinace má své odlišné vlastnosti, radikálně odlišné od vlastností složek samotných.

Kompozity jsme definovali jako materiálový systém, který je složen z více fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozpoznatelným rozhraním.

Konstatovali jsme, že studium těchto materiálů musí být interdisciplinární a že pro různé typy kompozitů platí stejné základní principy, existuje jistá podobnost a že výrazný pokrok může přinést jen syntéza dosavadních rozříštěných poznatků z různých oborů a vědních disciplín o různých jednotlivých materiálech.

Nalezli jsme, že základní rysy těchto materiálů, tj. jejich struktura a přítomost vnitřního povrchu, vnitřních mezifázových rozhraní a interakce s okolním prostředím, jsou spolu hlavními faktory určujícími jejich vlastnosti.

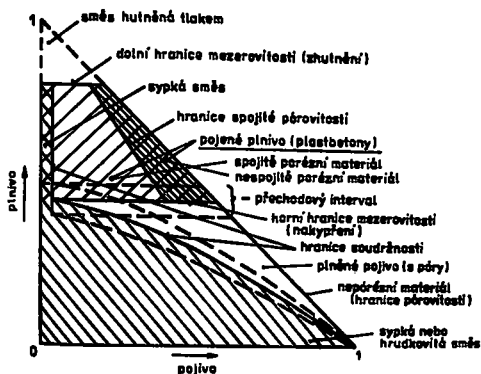
Klasifikovali jsme kompozity do tří základních typů (viz obr. 2 "Utřídění a definice..."):

- kompozity I. typu složené
1. z matrix a
 2. dispergované fáze (nebo fázi) v rozptýleném (segregovaném) uspořádání,
- kompozity II. typu složené
1. z matrix,
 2. dispergované fáze (nebo fázi) v hutném (agregovaném) uspořádání a
 3. dispergované třetí, tekuté fáze, jež zaplňuje uzavřené, s vnějším prostředím nekomunikovatelné, póry přítomné v systému,
- kompozity III. typu, které se od II. typu odlišují tím, že tekuté fáze vytváří vlastní spojité infrastrukturní systém, že tedy i porovitost systému je spojitá, spojená s vnějším prostředím.

Ukázali jsme si jednoduché klasifikační schéma (viz tab. 1 "Utřídění a definice ..."). Podrobněji ukazuje rozřídění kompozitů schéma na obr. 3.

Ing. Richard A. Baroš, CSc., ÚTAM ČSAV,
Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2

Podíváme se nyní ještě jednou, jak jsou zhruba, v celé škále kompozitů, zastoupeny jednotlivé typy, na příkladu jednotkového objemu vytvořeného ze dvou tuhých fází, bere-li se ovšem v úvahu i reálná možnost existence systému (obr. 1). Vidíme například,



Obr. 1 - Granulární kompozitní systémy (jednotka objemu)

Důvodem je, že tvar dispergované fáze přináší do kompozitního systému anisotropii vlastností, kterou lze sice považovat za klasifikační stupeň 2. řádu, ale která, je-li dostatečně výrazná, může překrýt i vliv základních faktorů, na nichž vlastnosti kompozitu závisí.

Bylo zde minule několikrát zdůrazněno, že inženýr v budoucnu bude muset navrhovat konstrukci současně s materiálovou kompozicí, bude-li chtít dodržet základní požadavek budoucnosti, navrhovat konstrukci energeticky nejušpornější. Byl tu uveden též jeden příklad vytváření tzv. hybridního kompozitu zesílením přírub válcovaného ocelového nosníku kompozitním materiálem. Chtěl bych na tomto příkladu naznačit, jak takový společný účinek konstrukce a materiálu by měl v budoucnu vypadat. Přirozeně, že cílem nemůže být pouhé zesílení přírub válcovaného nosníku kompozitem, i když to může být někdy výhodnější než například prosté přivaření ocelové pásnice. Jak by tedy měl budoucí konstruktér postupovat?

Vyjde z velikosti napětí, nebo lépe přetvoření, po délce i výšce elementu: je jasné, že není třeba dimenzovat krajní části nosníku stejně jako střední; je jasné, že největší tahová a tlaková napětí budou v krajních vlákních elementu; je jasné, že smykek budou namáhány nejvíce okrajové části a že největší smykek bude prostřed výšky; jsou též jasné směry a hodnoty hlavních napětí. Zásadou je vytvořit prvek, u něhož by pokud možno byly namáhány všechny části stejně, jinými slovy bylo využíváno stejnoměrně do systému vložené energie.

Pro taženou okrajovou část použijeme zřejmě vláknitého kompozitu, s průběžnými vlákny, orientovanými ve směru působení napětí, s vlákny pevnými a s relativně měkkou matrix (k utlumení případné poruchy některého vlákna), s malou soudržností vláken a matrix, jež přinese malou příčnou pevnost a tím účinně zneškodnění trhlin, které se stočí podél mezipovrchů a nijak neovlivní podélnou pevnost. V tlacené části bychom použili kompozitu s partikulárním plnivem, druhého nebo třetího typu, s touhou vlastní kostrou plniva. Při použití vláknitého kompozitu musela by být vlákna maximálně tuhá a styčný povrch mezi vlákny a matrix by měl mít vysokou tahovou pevnost, aby se zabránilo rozštěpení (delaminaci). Mezi přírubami by stačil materiál i s relativně malou pevností a malou hmotností, případně vyztužený ve směru hlavních napětí diagonálně, tak jako například příhradová konstrukce nebo železobetonový nosník. Ve středu výšky by byla stěna nejtlustší (jak s ohledem na smyky, tak na stabilitu stěny) a zabránění vybočení horní příruby by

Na diagonále leží ovšem i takové kompozity, jako jsou lamináty, nebo vlákniny vyztužené kompozity v nejširším pojetí, u nichž se uplatňuje výrazně, nebo až rozhodujícím způsobem vliv geometrického uspořádání dispergované fáze - vláken, i když z hlediska stavby kompozitů obecně je geometrie a podružná charakteristika.

mohlo být realizováno zakotvením horní pásnice do stěny prostřednictvím diagonální výztuže ve stěně. To je základ. Nyní přicházejí do úvahy speciální požadavky; například odolnost únavě se ovlivní volbou poměru vlastností matrix a vláken nebo partikulárního plniva. Odolnost zvýšeným teplotám se dosáhne použitím vláken s vyšším bodem měknutí (například bor, grafit, křemičitý korbid proti sklu). Odolnost chemickým vlivům se zajistí vhodnou volbou matrix, tenkým ochranným pláštěm atd., atd.

Ale vraťme se k vlastnímu tématu, partikulárním kompozitním materiálům (granulárním). O partikulárních kompozitech I. typu, tedy o systémech matrix s rozptýleným, segregovaným, neboli dispergovaným plnivem, podrobně hovořili prof. Veselý a Ing. Hugo. Nyní si všimneme některých vlastností partikulárních kompozitů II. a III. typu, tedy těch, ve kterých plnivo je agregováno, neboli dispergované fáze vytváří agregovanou infrastrukturu.

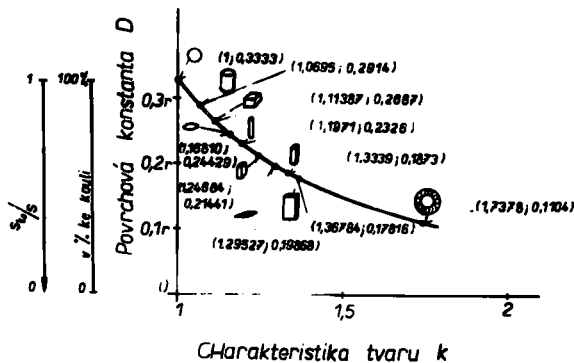
Typickými představiteli takových materiálů je například cementový beton nebo plastbeton, tj. soustava, v níž matrix je vytvořena syntetickou, obvykle termosetickou pryskyřicí a dispergované fáze je obvykle anorganického původu.

V takových systémech prvním ovlivňujícím parametrem je geometrická formulace a uspořádání plniva, jež ovlivňuje hustotu dispergované fáze a tedy i její mezerovitost. Souvislý skelet plniva lze vytvořit s různou mezerovitostí; dobře granulované a ztuhlé směsi, složené z několika frakcí mají mezerovitost pod 20, ale i pod 10-6 % celkového zaujatého objemu, špatné směsi plniva až 55 %. Poznamenejme jako teoretický model, že objem mezer prostředí zaplněného stejnými kuličkami (nezávisle na průměru) může kolísat podle geometrického uspořádání kuliček od 26 do 47,6 % (při náhodném uspořádání kolem 39 %). U systému z kuliček dvojnásobného průměru (když menší kuličky mají takový průměr, aby se vešly do mezer kuliček větších) lze dosáhnout minimální mezerovitosti 9,3 %. Obdobně lze změřit mezerovitost u systému kuliček trojnásobného průměru. Z tohoto modelu vyplývají i zásady volby granulometrie připravovaných směsí, že zrn nepravidelného tvaru. Skutočností je, že největší snížení mezerovitosti se nedosáhne skládáním směsí podle různých tzv. ideálních křivek zrnitosti, ale skládáním z různých poměrně úzkých frakcí a podle tzv. přetržitě křivky zrnitosti, přičemž přetržka musí být tak velká, aby zajistila, že menší zrna (zrna menší frakce) se vejdou do mezer frakce s většími zrny a že je nadobou svou přítomností rostlačovat.

Čím menší je mezerovitost, tím menší množství pojiva (matrix) je nezbytné k zaplnění zbývajících mezer, a tím ekonomičtější bude výsledný materiál. Matrix však nejen zaplnuje volné prostory, ale též obaluje jednotlivá zrna slabou blánou, jejíž tloušťka závisí na vlastnostech matrix a stykovém napětí obou fází. Pohybuje se obvykle kolem 0,005 - 0,2 nm. Tím je množství potřebné matrix vázáno též na specifický povrch plniva, což znamená závislost nejen na velikosti jednotlivých zrn, ale i na jejich tvaru a jakosti povrchu. Jak se mění specifický povrch zrn podle jejich tvaru ukazuje například obrázek 2. Je zřejmé, že nejvýhodnější zrna budou z tohoto hlediska ta, která mají nejmenší povrch; požadavek dokonalé spolupráce zrn s matrix vyžaduje dobrou soudržnost, což může na druhé straně vyžadovat zvýšení specifického povrchu, zejména jedli o soudržnost realizovanou pouze adhezí. Matrix přináší kompozitu řadu žádaných vlastností, avšak na druhé straně vnáší do něj i některé své nevídané vlastnosti (například v případě polymerní matrix velké polymerační smrštění, velký součinitel teplotní roztažnosti, velký creep, malou odolnost zvýšeným teplotám atd.). Řešení přináší kombinace kompozitních typů: v kompozitu II. nebo III. typu lze použít namísto čisté matrix kompozitní systém I. typu, tedy matrix plněnou dispergovaným mikroplnivem; to výrazně zlepší nevýhody dříve uvedené, neovlivní nepříznivě výslednou pevnost a ostatní vlastnosti kompozitu a ušetří relativně drahou matrix. Musí být dbáno pouze toho, aby velikost zrn mikroplniva zůstala pod max. 1/3 průměrné tloušťky obalových vrstev větších zrn; jinak se může stát naopak součástí, jež systém nakypřuje a vlastnosti zhoršuje (obr. 3).

Praktickým požadavkem na kompozitní systém je obvykle jeho nepropustnost, čili zajištění, aby jeho porovitost byla nespojitá, což je charakteristika kompozitu II. typu. Úspora pojiva a zlepšení vnitřní napjatosti jsou na druhé straně důvody pro návrh systému s maximální možnou porovitostí, takže optimem je zřejmě systém těsně pod hranicí mezi II. a III. typem.

Dokonalá skladba a geometrie plniva vede k tomu, že množství matrix k dosažení tohoto stavu je značně nízké, např. 1/5 - 1/7 objemu plniva. To ovšem může vést k tomu, že - má-li matrix v nezavrtěném stavu vyšší viskozitu, je směs špatně zpracovatelná a nedokonalost zpracování může znehodnotit přínosy a klady dokonalé skladby plniva a celé směsi. Proto dalším nezbytným po-



Obr. 2 - Změna povrchové konstanty $D = \frac{V}{S}$ pro různé tvary zrn specifikované tvarovou charakteristikou $k = \frac{V}{r^3}$, kde V, S jsou objem a povrch zrna, r je poloměr fiktivní koule stejného povrchu jako uvažované zrna a r je poloměr srovnávací koule o objemu stejném jako uvažované zrna

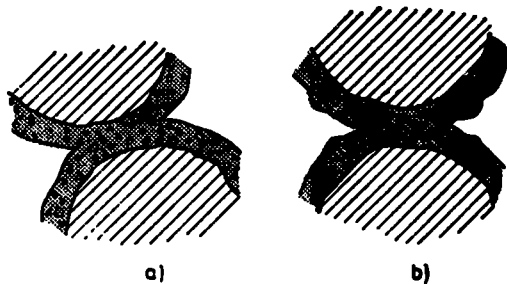
rozhraní obou fází, na němž též dochází k prvním mikroporuchám systému. Každé zvětšení soudržnosti plniva a pojiva tak podstatně ovlivní pevnost systému, stejně jako hraje významnou roli přetvárnost styku. Umožní-li styk pootáčení zrn v matrix svými reologickými nebo pružnými vazbami vlastnostmi, zvýší se významně disipace energie v systému, a tím například jeho pevnost a houževnatost. Na pevnostních vlastnostech matrix, samozřejmě v jistých mezích, v podstatě nezáleží na rozdíl od kompozitů I. typu, kde tomu je naopak.

Protože k vytvrdnutí těchto pojiv dochází obvykle exotermní reakcí, provázenou téměř vždy objemovým smrštěním, vznikají v závislosti na rychlosti vedení reakce, objemu tělesa, podmínkách okolního prostředí atd. složité stavy primárního (někdy též říkáme rodového) napětí, jež jsou kombinací napětí od smrštění při tvrdnutí a účinků napětí od teplotních změn během polymerace v důsledku nestejných součinitelů teplotní roztažnosti složek.

Řada charakteristik kompozitu, jako pružnost, součinitel teplot-

žadavkem je dokonalé smíšení a zpracování směsi k dosažení jednak homogenity složení, jednak co nejtěsnějšího uspořádání plniva.

Pevnost a houževnatost systémů těchto typů jsou závislé jak na těchto vlastnostech fází, tak na řadě dalších činitelů, daných kompozitním působením. Při nestejných modulech obou fází (tedy nestejně deformabilitě) dochází k nestejněměrnému rozdělování napětí soustředování do míst méně stlačitelných a tím ke vzniku příčných trhů. Kritické je



Obr. 3 - Směs pojiva a mikroplniva mezi zrn štěrkopísku
a) vhodná velikost zrn mikroplniva
b) nevhodná velikost

ní roztažnosti, dielektrická konstanta a do jisté míry i pevnost lze poměrně přesně stanovit z vhodné kombinace stejných nebo příbuzných charakteristik složek podle jejich objemového zastoupení v systému při použití vhodné strukturního a kombinačního modelu. Pokud je nám známo, zatím nejvíce se přiblížil ke skutečnosti a dává nejlepší shodu model Navrátila při opakovaném použití vztahů Hirsch-Dougill-Navrátil. Ale o tom blíže až někdy jindy.

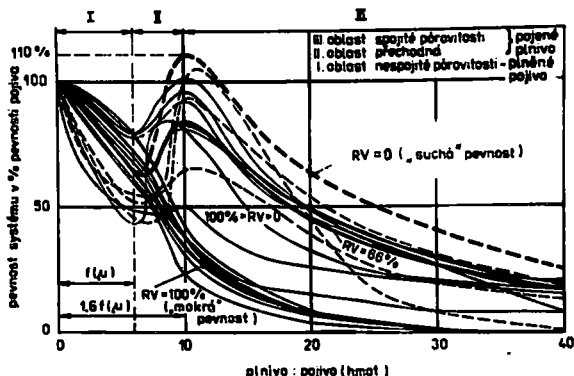
Pro objektivní hodnocení materiálu (libovolného stáří a historie) je třeba navíc nalézt a definovat vztah vycházející z energetického hodnocení systému. Tomu by mohla vyhovovat např. tzv. elastance (), čímž je míněna schopnost materiálu být pružným v libovolném stadiu své existence: tato schopnost je postupně ztracena, vyčerpávána opakovaným namáháním (opakovaným nebo dlouhodobým zatížením, teplotou, vlhkostí apod.). Elastanci by bylo možno z tohoto hlediska chápat jako základní kvalitativní charakteristiku pružnosti.

Pro kvantitativní popis elastance materiálu navrhl autor novou materiálovou konstantu, nazvanou absorbent pružnosti, jež je funkcí složení materiálu M a jeho historie H , zahrnující vliv času, teploty, směru a způsobu zatížení, vnitřní napjatosti atd., tj.

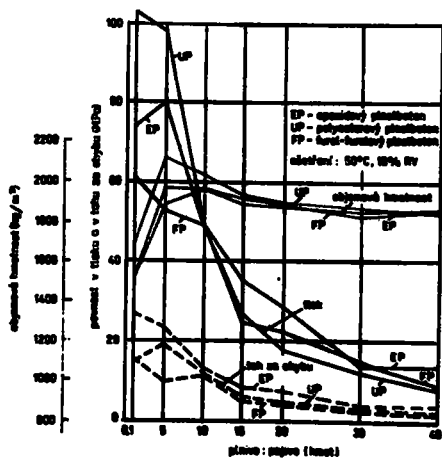
$$A = f(M, H).$$

Každému definovanému materiálu náleží tedy jediný absorbent pružnosti. Změna absorbentu pružnosti během přetváření je nesporně úměrná změně vydané (ztracené) energie. Jeho maximální hodnota odpovídá celkové energii porušení (destrukční či dehezní energii) v teoreticky ideálním materiálu. Přetvořený, porušený (např. vnitřně) nebo jinak unavený materiál má nižší hodnotu absorbentu pružnosti. Nulovou hodnotu má materiál plně porušený (). Protože absorbent pružnosti je funkcí všech konvenčních materiálových charakteristik, může být i základem jejich popisu.

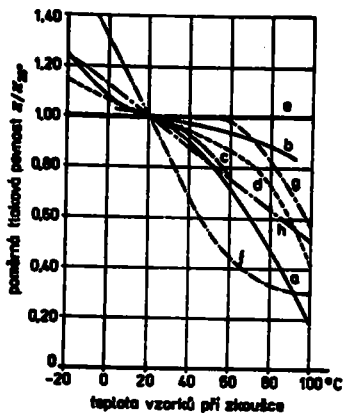
Na několika příkladech ukáži nyní vlastnosti různých druhů kompozitů (s různou polymerní matricí).



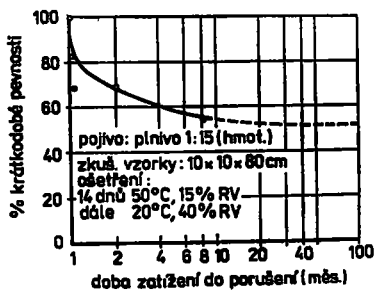
Obr. 4 - Průběh pevnosti furanových systémů podle poměru plniva k aktivnímu pojivu pro různé směsi při různém nasycení systému vodou



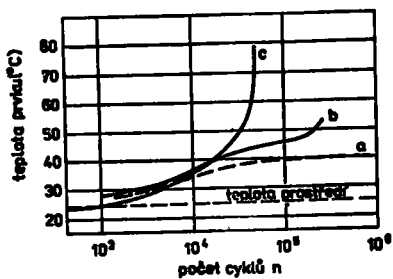
Obr. 5 - Změna objemové hmotnosti, pevnosti v tahu a v tahu se svislým oříznutím za chybu různých plastbetonů se změnou jejich sležení



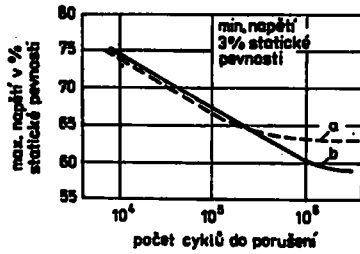
Obr. 6 - Změna pevnosti plastbetonů s teplotou a - 9 až 13 % hmot. UP (4), b - 10 % hmot. MMA (5), c - 10 až 12 % hmot. UP (6), d - 9 % hmot. EP (+ amin za normální teploty) (7), e - 10 % hmot. EP (+ aromatický amin nebo methylanhydrid za tepla) (7), f - 10 % hmot. EP (+ polyamid za norm. teploty) (8), g - 10 % hmot. FP (3), h - 20 % hmot. FP (11).



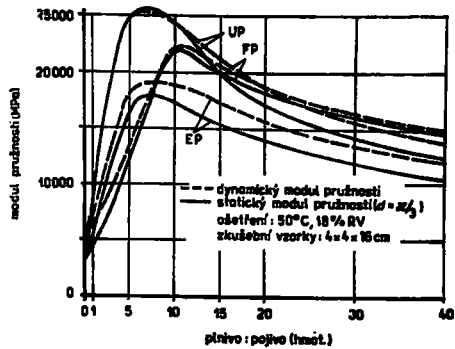
Obr. 7 - Trvalá pevnost (v tahu za ohybu) furolfuralového plastbetonu



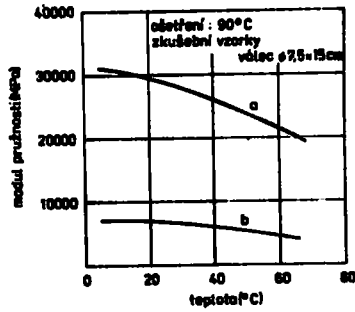
Obr. 8 - Změna teploty vzorku polyesterového plastbetonu
 s počtem cyklů (n)
 a - max. napětí 52 % statické pevnosti, 200 c/min,
 b - max. napětí 55 % statické pevnosti, 200 c/min,
 c - max. napětí 52 % statické pevnosti, 400 c/min



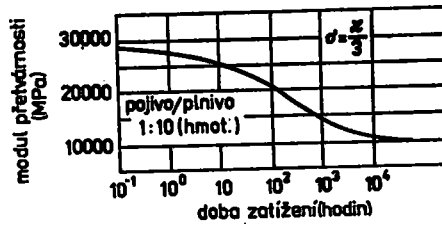
Obr. 9 - Závislost únavové pevnosti na počtu cyklů
 a - s 1 % sílanové přísady,
 b - bez sílanové přísady



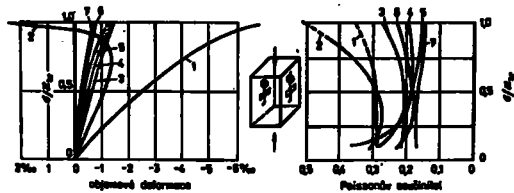
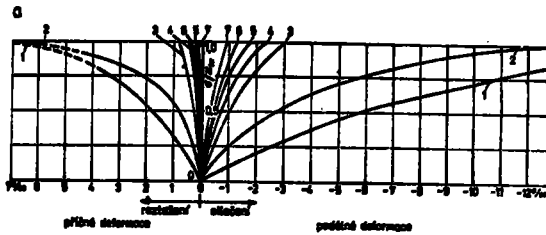
Obr. 10 - Závislost dynamických a statických modulů pružnosti různých plastbetonů na složení směsi



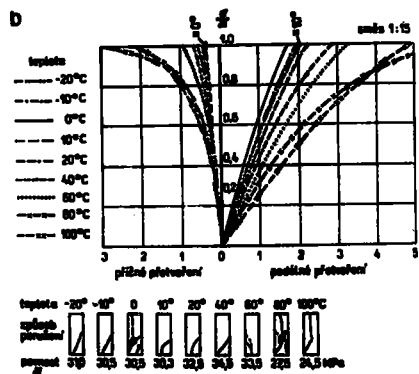
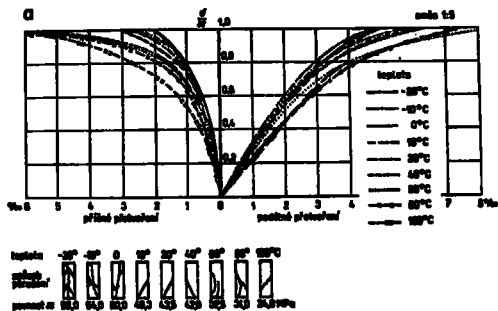
Obr. 11 - Změna modulu pružnosti polyesterového plastbetonu s teplotou
 a - 10 % (hmot.) UP + šterkopisek
 b - 50 % (hmot.) UP + práškový CaCO_3



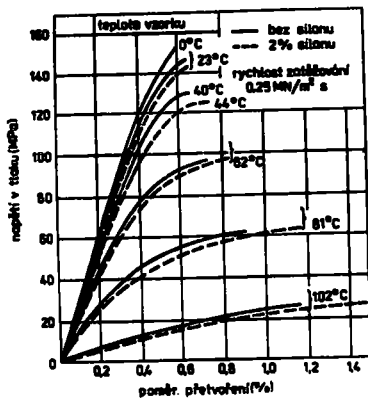
Obr. 12 - Změna modulu pružnosti (přetvárnosti) polyesterového plastbetonu s dobou zatížení



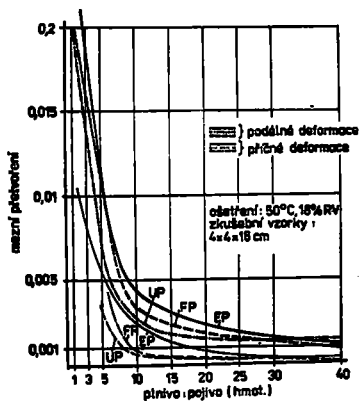
Obr. 13 a a 13 b - Vliv složení plastbetonu na pracovní diagramy a Poissonův součinitel (aktivní pojivo:plnivo 1:1; 1:5; 1:10; 1:15; 1:20; 1:30; 1:40; hmot., ošetření 50 °C, 18 % RV 14 dnů, zkušební vzorky 4 x 4 x 16 cm)



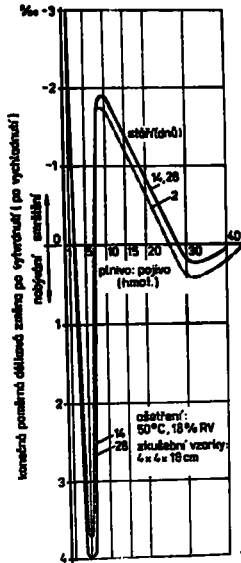
Obr. 14 a a 14 b - Změna pracovních diagramů fural-furalového plastbetonu s teplotou
 a - směs 1:5 hmot.,
 b - směs 1:15 hmot.



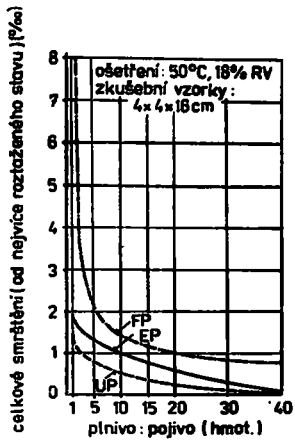
Obr. 15 - Změna pracovních diagramů polyesterového plastbetonu s teplotou



Obr. 16 - Závislost podélného a příčného mazního přetvoření v tlaku různých plastbetonů na složení směsi

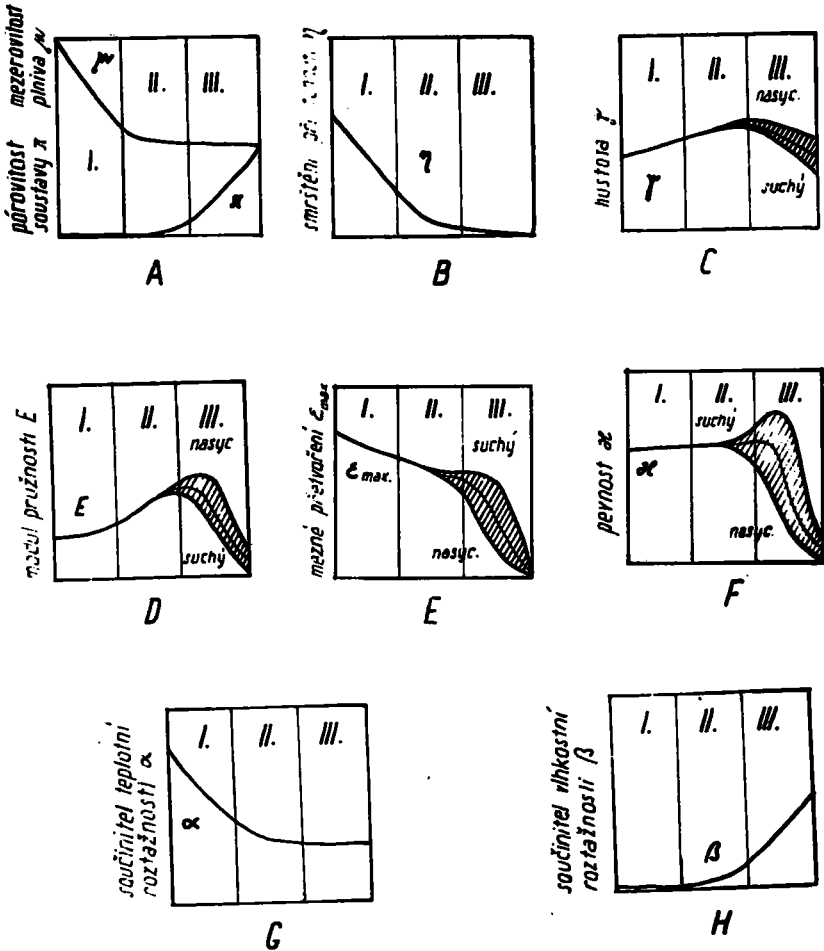


Obr. 17 - Závislost podélného a příčného mezího přetvoření v tlaku různých plastbetonů na složení směsi

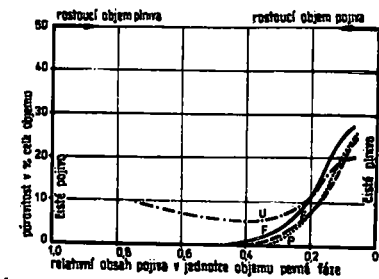
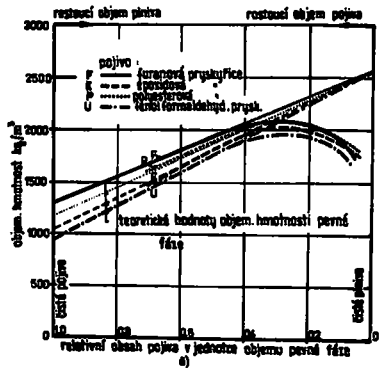


Obr. 18 - Průběh celkových hodnot smrštění (při vytvrzování za zvýšené teploty) jednotlivých plastbetonů v závislosti na složení směsi

Schemata na obr. 20 jsou uvedena v souřadném systému podle hmotových dílů pojiva (matrix) k plnivu (dispergované fázi) pro kompozit typu plastbetonu, v němž dispergovaná fáze je křemenný štěrkopísek s objemovou hmotností cca 1500 - 1700 kg/cm³. Toto zobrazení bylo zvoleno protože, že při použití objemových poměrů (podílu objemových částí matrix a dispergované fáze v jednotce objemu solidu v kompozitu) se stírá význam II. a zejména III. typu. Při objemovém zobrazení převážnou část diagramu zaujímají systémy I. typu; pro ilustraci je schematický přehled podle obr. 20 uveden znovu v objemovém měřítku na obr. 21. Skutečně získané hodnoty pro různé druhy matrix ukazuje ještě obr. 22.

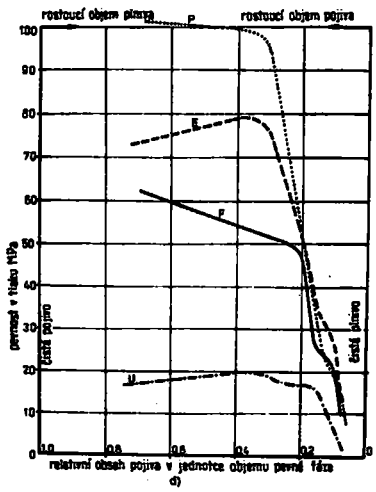
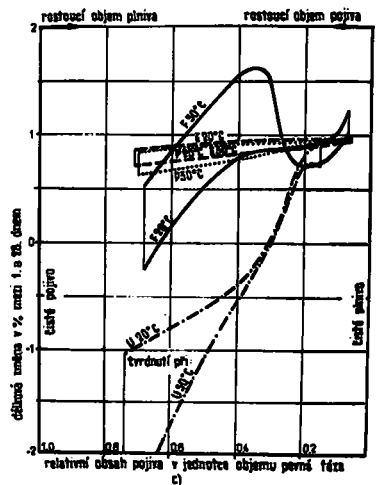
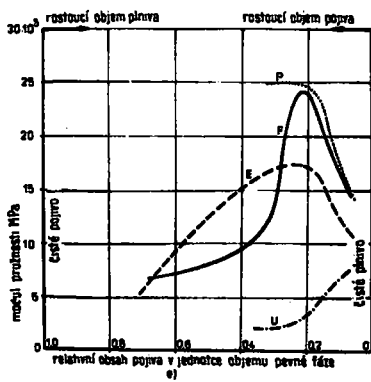


Obr. 21 - Schematické znázornění fyzikálních vlastností kompozitů různého typu



uretan	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀
epoxid	V ₁₁	V ₁₂	V ₁₃	V ₁₄	V ₁₅	V ₁₆	V ₁₇	V ₁₈	V ₁₉	V ₂₀
poliester	V ₂₁	V ₂₂	V ₂₃	V ₂₄	V ₂₅	V ₂₆	V ₂₇	V ₂₈	V ₂₉	V ₃₀
formaldehyd	V ₃₁	V ₃₂	V ₃₃	V ₃₄	V ₃₅	V ₃₆	V ₃₇	V ₃₈	V ₃₉	V ₄₀

hmotnostní poměr část. pojiva k plnivu



Obr. 22 - Průběh některých fyzikálních vlastností partikulárních kompozitů s makromolekulární matrix podle vzájemného poměru složek

LITERATURA

- [1] Baroš, R.: Materiály, Učební texty Institutu pro výchovu vedoucích pracovníků chemického průmyslu, ICHP, Praha 1981
- [2] Baroš, R., Javornický, J., Navrátil, J.: Some Basic Features in Mechanics of Inhomogeneous Materials, Proc. of Internat. Conf. on Mech. Behaviour of Materials, Vol. V., s. 42-53, Kyoto, 1972
- [3] Baroš, R.: Temperaturbeeinflussung der Elastizität und Festigkeit von Kunststoff-Betonen, Zement-Kalk-Gips, roč. 26, 1973, č. 2
- [4] Kobayashi, K., Ito, T.: Several Physical Properties of Resin Concrete, Polymers in Concrete (Proc. 1. Int. Congress on Polymer Concretes 1975), Lancaster, The Construction Press, 1976
- [5] Kobilíček, P.: Synthetic Resin-bound Concrete, Polymers in Concrete (Proc. 1. Int. Congress on Polymer Concretes 1975), Lancaster, The Construction Press, 1976
- [6] Okada, K., Koyanagi, W., Yonezawa, T.: Thermo-dependent Properties of Polyester Resin Concrete (Proc. 1. Int. Congress on Polymer Concretes 1975), Lancaster, The Construction Press, 1976
- [7] Ataynes, B. W.: Epoxide Resin Concrete as a Structural Material (Proc. 1. Int. Congress on Polymer Concretes 1975), Lancaster, The Construction Press, 1976
- [8] Valore, R.C., Naus, D.J.: Resin Bound Aggregate Material Systems, Polymers in Concrete (Proc. 1. Int. Congress on Polymer Concretes 1975), Lancaster, The Construction Press, 1976

KOMPOZITNÉ MATERIÁLY S KOVOVOU MATRICOU

L. Táboraký

Riešenie náročných konštrukčných celkov v modernej strojárskvej výrobe vyžaduje nové konštrukčné materiály s podstatne vyššími fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami, akých dosahujú klasické konštrukčné materiály. Tento problém úspešne riešia zložené materiály spevnené vláknami, ktoré vzhľadom na dobré mechanické vlastnosti našli svoje miesto medzi klasickými materiálmi a ich rozvoj má stúpajúcu tendenciu. Príčina je v tom, že u materiálov spevnených vláknami teoreticky je možné zvýšiť špecifickú pevnosť a špecifický modul pružnosti v ťahu až päťnásobne v porovnaní s klasickými materiálmi. Uvedené výrazné zvýšenie špecifickej pevnosti a modulu pružnosti umožňujú spevňujúce vlákna s kovalentnou väzbou, čo názorne potvrdzujú niektoré hodnoty uvedené v tabuľke.

Materiál	Špecif. hmotnosť ρ [kg/m ³]	Modul E [GPa]	$E/\rho \cdot 10^3$ [m ² s ⁻²]
Al	2700	69,5	27,00
Fe	7800	207,0	26,20
Tl	4500	117,8	27,00
W	19300	411,0	21,30
B	2600	417	160,40
SiC	2990	430	143,80
C	1950	410	210,26
Al ₂ O ₃	3300	345	117,0

Z tabuľky je vidieť, že u materiálov s kovovou väzbou nie je možné zvýšiť špecifický modul pružnosti a zvýšenie ich špecifickej pevnosti doteraz používanými spôsobmi ich spracovania nie je výrazné. Na druhej strane materiály s kovalentnou väzbou (druhá časť tabuľky) sú charakterizované nízkou špecifickou hmotnosťou a vysokým modulom pružnosti, čoho výsledkom je vysoký špecifický modul pružnosti (teoreticky až 5-násobne vyšší, ako u materiálov s kovovou väzbou).

Ing. Ladislav Táboraký, CSC., ÚMMS SAV,
Februárového víťazstva 75, 801 00 Bratislava