

Československá společnost pro mechaniku při ČSAV

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Texty přednášek ze semináře "Kompozitní materiály", pořádaného ČSM ve spolupráci s pobočkami
CVTS 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

UTŘÍDĚNÍ A DEFINICE NĚKTERÝCH ZÁKLADNÍCH POJMŮ V MECHANICE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Richard A. Bareš

Oborem mechaniky kompozitních materiálů je oblast problémů, které nelze zahrnout zcela do žádného dosud historicky konstituovaného vědního oboru; je proto nezbytné jako první krok provést utřídění pojmů a vypracovat jejich definice. To je nezbytné i proto, že mechanika kompozitních materiálů se opírá o soustavu vědních poznatků z řady disciplín, jako je fyzika, mechanika, chemie, fyzikální chemie, metalurgie, makromolekulární chemie atd., v nichž jsou různé pojmy používány s více či méně odlišným širším nebo užším významem.

V souvislosti s řešením problémů nehomogenních materiálů byl proto již počátkem 70 let vypracován v ÚTAM, oddělení složených materiálů, soubor definic základních pojmů oboru. Přitom však se bere v úvahu, že podání definice nemusí být v každém případě zcela vystihující, a že se musí zdokonalovat a jejich obsah zpřesňovat, podle rozvoje poznatků. Dané definice pokládáme proto za výchozí terminologii, nezbytnou k zavedení společného jazyka všech, kteří v dané oblasti pracují.

Mechanika materiálů

je vědní obor, zabývající se přetvárným chováním hmotných struktur za působení vnějších zatížení jakéhokoli fyzikálního nebo chemického původu v nejširších jejich souvislostech. V našich úvahách se omezíme na materiály pevné.

Fyzikálně-chemická mechanika materiálů

jako speciální odvětví mechaniky materiálů zkoumá stav napětí a přetvoření v hmotném prostředí jako důsledek fyzikálních a chemických procesů při přetváření probíhajících. Je to hraniční disciplína mezi fyzikou pevné fáze, fyzikální chemií povrchových jevů a disperzních systémů a mechanikou. Jejím základem je nauka, společná všem těmto oborům, tj. termodynamika.

Úlohou fyzikálně-chemické mechaniky v oblasti konstrukčních hmot je objasnění zákonitostí pohybu hmotných elementů uvnitř pevných materiálů a stanovení vlastností materiálů jako funkcí složení, struktury a přetvárných vlastností látek je tvořících a konfigurace rozložení těchto látek v materiálu za působení silového pole a fyzikálně-chemického spolupůsobení okolního prostředí.

Byl-li naznačen vztah s fyzikou pevné fáze, je na místě charakterizovat rozsah fyzikálně-

Ing. Richard A. Bareš, ČSA., ÚTAM ČSAV,
Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2

-chemické mechaniky směrem k nejmenším částicím hmoty, které uvažuje. Takovou hranici nelze vymezit jednoznačně, neboť zdaleka na formě existence každého jednotlivého materiálu (aglomerát, polukrystal, amorfní hmota) a na vlivu, který tato forma na přetvárné chování má. Pokud klade me technický důraz na pevnou složku materiálu, je možno s jistotou licencí za hranici pokládat tak malé částice hmoty, které se ještě řídí Newtonskými principy pohybu, nebo na něž lze tyto abstrahovat.

Mikromechanika

je zvláštní, krajní případ této obecné nauky, neboť neuvažuje fyzikální a zejména chemické vlivy za dané základní vlastnosti složeného systému a vychází pouze z definování složeného elementu, s kterým pracuje pak jako mechanika kontinua.

Jako objekt svého zkoumání uvažuje fyzikálně-chemická mechanika hmotné prostředí nebo materiál. Hmotné prostředí rozumíme prostor, vyplněný jakoukoliv hmotou a z povahy věci vyplývá, že převážně jde o hmotu pevnou. Je-li předmětem úvah hmotné prostředí omezené v konečtu, mluvíme o tělese. K rozlišení skupenství je s ohledem na cizojazyčnou literaturu vhodné označovat pevnou hmotu jako solidus a hmotu tekutou, tj. kapalnou či plynnou jako liquidus. Zaplňuje-li pevná fáze jistý objem prostoru, který není význačný svým geometrickým tvarem, mluvíme o pevné fázi v komaktu (bulk) na rozdíl od pevné fáze uspořádané ve vláknkách, foliích, whiskerech.

Teoretická představa hmotného prostředí se do praktické aplikace promítá jako materiál; tento termín zároveň znamená, že takové hmotné prostředí má určité technické použití. Ideální materiál (hmotné prostředí) je takový, který splňuje teoreticky žádané podmínky a jen tyto v daných mezích. Reálný materiál je takový, který odpovídá po všech stránkách příslušnému skutečnému konstrukčnímu materiálu, není však zatížen jeho náhodnými nedokonalostmi, poruchami, variabilitou jakosti apod. V technické praxi se pak setkáváme pouze s konkrétním materiálem.

Mechanickým chováním materiálu

rozumí se spojitá změna stavu při přetvárném ději, to znamená při měnících se vnějších podmínkách. Stav materiálu je definován, protože je to termodynamický systém, jeho makroskopickými vlastnostmi. Rovnovážný stav je charakterizován konstantními hodnotami makroskopických vlastností. Z experimentů je známo, že pouze omezený počet vlastností je nezávislých na daném systému. Vlastnosti nezávislé na hmotě systému jsou označovány jako intenzivní. Vlastnosti závislé na hmotě systému jsou označovány jako extenzivní (aditivní).

V materiálech, které obecně nejsou homogenní, je nutné přihlídnout k jejich skladbě. Různé látky je skládající označujeme jako fáze, a to nejen s ohledem na skupenství té které látky - fáze pevná, tekutá (kapalná, plynná), ale i na jejich chemickou podstatu. Podle toho je fáze každá fyzikálně homogenní součást hmotného prostředí, fyzikálně oddělená od ostatních jeho koexistujících součástí. Přitom nezáleží na tom, zda fáze tvoří souvislý celek nebo oddělené částice. Naopak částice, jejichž fyzikální a chemické chování je stejné, přísluší této fázi, i když některé jejich fyzikální vlastnosti jsou odlišné (například optické antipody).

K odlišení souboru pevných fází od jiných a zdůraznění jejich významu v materiálu se tyto označují jako primární fáze na rozdíl od tekuté sekundární fáze.

Jednotlivé fáze existují v materiálu v různé konfiguraci i v různé podobě. Máme-li na mysli jejich skladbu obecně, nebo v užším smyslu pouze geometrii takové konfigurace, mluvíme o soustavě (systému), kterou rozumíme souhrn fyzikálních těles, který jako celek považujeme za oddělený od ostatního světa, tvořícího vnější, okolní prostředí (okolí). Uvažuje-li se však takové prostorové uspořádání včetně určitých fyzikálních vlastností, především vzájemné vazby, mluvíme o strukturu. Protože tento termín má mnohdy volnější obsah, musíme připustit i označení, jako například struktura hrubozrná, která se vztahuje spíše k jakosti než k fyzikální podstatě; takové odchylky však jsou ze souvislosti srozumitelné a nemohou porušit smysl vyjádření. Někdy bude užitečné zdůraznit i zvláštní charakter struktury, projevující se určitou orientovaností nebo jinou pravidelností; takový charakter se označuje jako textura.

S přihlídnutím k fyzikální povaze skladby hmotného prostředí a pro zachování abstrakce obecného pohledu je vhodné podržet v popisu materiálů označení strukturní systém, u něhož rozho-

dující vliv uplatňují napětí 1. druhu. Termín mikrostruktura je ponechán v mechanice materiálů pro oblast studia napětí 2. a 3. druhu.

Převážná část objemu konstrukčního materiálu je tvořena pevnými fázemi. Nejčastěji jsou tyto fáze dvě a částice jedné z nich jsou ve druhé fázi rozptýleny. Fáze, která tvoří částice rozptýlené, se označuje jako fáze dispergovaná (rozptýlená), fáze, která tyto částice nese, jako fáze disperzní (rozptylující), častěji, s ohledem na její generalní povahu, jako matrice. Dispergované částice, mají-li mít z mechanického hlediska strukturní význam, budou převážně prostým okem zjistitelné, a proto o nich mluvíme jako o zrnech. Strukturní systémy v mechanice materiálů jsou právě z tohoto hlediska makrodisperzní systémy na rozdíl od fyzikální chemie, pro kterou jsou disperzní systémy také koloidy a jiné systémy s rozptýlenými i elementárními částicemi.

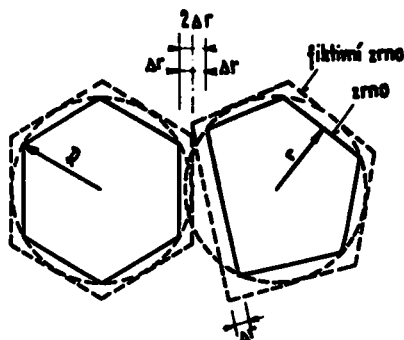
Matrice může být ovšem tvořena i více pevnými fázemi případně v kombinaci s tekutou fází; rozhodující pro přiřazení tohoto označení je její disperzní funkce. Technologická interpretace těchto pojmů znamená poliva pro matici a plniva pro fázi dispergovanou. V tomto smyslu mohou fáze tvořit i diskrétní (nevyplněné) prostory.

Je-li zrn v matici velmi málo, jsou od sebe značně vzdálena, a pak lze taková jednotlivá zrna uvažovat jako vněšky, inkluze. Skupina částic obvykle velmi blízkých nebo v kontaktu, je aglomerát. Systémy kompaktní a navíc aglomerované jsou označovány jako coalescentní.

Je-li z povahy věci nutno uvažovat strukturu aglomerátů nebo jednotlivých částic dispergované fáze, mluvíme o substruktuře. Jestliže při abstrakci separujeme jednotlivé přítomné pevné nebo i tekuté fáze, tvoří tyto fáze vlastní, samostatnou infrastrukturu, ovšem ve stejné konfiguraci, jakou mají v uvažovaném disperzním systému.

Superstrukturní systém je tvořen složkami, které mají vlastní strukturu. Koloidní systém analogický superstrukturnímu je mezaloid. Superstrukturní systém může být tvořen složkami stejné nebo různé struktury. Podle toho je možné rozlišit dále supermonostrukturní systém, vyskytují-li se pouze složky téže struktury a supermultistrukturní systém, který má složky více struktur; obvykle se tento termín neuvádí, neboť obecný výraz superstrukturní tuto skutečnost dostatečně vyjadřuje.

Dispergovaná fáze je v matici agregována, jsou-li její zrna vzájemně vzdálena, nejsou-li spolu v kontaktu; zrna této fáze tvoří agregát. Jsou-li zrna dispergované fáze v kontaktu alespoň v jednom bodě, obklopená maticí případně i částicemi tekuté fáze, tvoří agregát. Je-li fáze agregována, nemusí být její zrna v přímém dotyku jednoho s druhým, neboť obvykle zůstává mezi nimi slabá vrstva disperzní fáze, vázaná povrchovými silami.



Obr. 1

+) K analýze těchto systémů je nezbytný jejich geometrický popis. Každému zrnu dispergované fáze je možno opsat kouli; její střed lze pokládat za střed centrální souřadné soustavy, zrnu přiřazené. Každý bod povrchu zrna má podle toho radiální souřadnici r ; maximální hodnota této souřadnice pro bod povrchu zrna je poloměr jeho opsané koule R .

S ohledem na hmotové síly působící mezi každými dvěma částicemi hmoty (tedy i mezi zrny a maticí), jejichž velikost ale velmi rychle klesá se vzdáleností, je třeba zrnu dispergované fáze přiznat větší objem, než jeho hmotu zaujímá, aby úvahy o vzájemném vlivu zrn odpovídaly skutečnosti. Jako dispergované částice budeme proto uvažovat fiktivní zrna, jejichž všechny radiální souřadnice jsou zvětšeny o Δr .

Jsou-li všechna zrna stejně velikosti, mluvíme o monotonním agregátu, při složení ze zrn dvojnásobné velikosti jde o binární agregát, ze tří různých zrn o ternární agregát atd. Je-li aglomerát složen z n druhů částic různé velikosti, zastoupených ve směsi podle spojitě křivky zrnitosti, mluvíme o spoilitém agregátu, v případě, že směs je složena podle přetržité křivky zrnitosti, o přetržitém agregátu. Obdobně zprávně lze ovšem aplikovat i pro segregát.

Na všude přichází v úvahu toto rozlišení: například eutektická slitina znamená systém dvou fází o samostatných infrastrukturách.

Důležitým objektem zkoumání je plocha, již jedna fáze s druhou sousedí; označujeme ji rozhraní fází, v podstatě se jí může rozumět povrch částic dispergované fáze. Jinou významnou okolností je charakter vazby na rozhraní fází. Chemické a fyzikální síly způsobují, že materiál zůstává pevný i za působení vnějších sil; v takovém případě jde o strukturní systém konjugovaný, na rozdíl od strukturního systému disjunktovaného, kde vazby mezi zrny jsou tak slabé, že systém má jen omezenou soudržnost (jako například u sypkých materiálů, zemín apod.). Disjunktovaný systém s částicemi různých tvarů i rozměrů se označuje jako systém partikulární; systém, jehož zrna mají osově rozměry nepřímě rozdílné, je systém granulární.

Hustotou materiálu (strukturního systému) se rozumí ve všech úvahách měrná (specifická) hmotnost ρ , tj. hmota reprezentativního objemu; u nehomogenních materiálů znamená vlastně oblemovou hustotu. Reprezentativním objemem se rozumí objem systému, který má průměrné vlastnosti celku a jeho hranicí je nejmenší objem, který tyto vlastnosti ještě zachovává. Mikroobjem rozumí se takový nejmenší objem fáze (nebo zrna), který má ještě průměrné vlastnosti fáze (nebo zrna). Hustotou rozložení fáze se rozumí objem částic dispergované fáze, připadající na jednotku reprezentativního objemu strukturního systému. Vnitřní povrch objemu v nehomogenním prostředí je součet povrchů všech zrn dispergované fáze a všech porů či částic tekuté fáze. U matrice je třeba rozlišovat skutečný objem od fiktivního objemu, tj. objemu matrice zmenšeného o objem pevně vázaný na povrchu zrn, který uvažujeme jako jejich fyzikální součást.

Dispersita systému je poměr (vnitřního) povrchu všech dispergovaných částic systému k jejich celkovému objemu v jednotce objemu systému. Množství matrice, jež je právě potřebné jen k obalení všech zrn agregátu, je nazýváno kritické množství. Zmenšováním objemu matrice pod tuto mez vznikají v superstrukturním systému aglomeráty disjunktovaných zrn a soustava přechází do partikulárního systému.

Materiál nebo hmotné prostředí je nehomogenní, obsahuje-li různé pevné fáze a tekuté fáze, dále nevyplněné diskrétní prostory, poruchy vazeb, jako například vnitřní trhliny nebo disjunktované oblasti apod. Za heterogenní považujeme v užším smyslu takový materiál, který je v celém svém objemu tvořen těmiž různými pevnými a tekutými fázemi, přičemž alespoň pevné fáze mají všude pevné vazby a strukturní poruchy nejsou jeho inherentní vlastnosti. Porézní je také prostředí, jehož strukturní prostory nevyplněné pevnou fází jsou prostupné, nebo by byly prostupné, byly-li by komunikovány s vnějším okolím, pro tekutou fází. Podle toho je homogenní pouze také prostředí, které je tvořeno toutéž fází v kompaktním stavu.

Klasifikace dispersního systému

Uvažujeme dvě hmotná prostředí o různých pevných fázích; prvému z nich (kvasi-homogenní) přiřadíme funkci matrice, druhé nechtí plní funkci dispergované fáze a předpokládáme tudíž, že má granulární strukturu. Jednotkový objem pak je možno vyplnit za nejrůznějšího poměru obou fází. Je evidentní, že extrémní případy jsou jednotkové objemy vyplněné pouze jednou z daných fází. Za počáteční považujeme systém vyplněný pouze kvasi-homogenní fází, postupně objem odebraný této fází nahraďujeme druhou fází (granulární) tak, že jí v původní rozptýlíme. Konečný stav pak

*) Pokračování poznámky z předchozí strany:

Pak podle definice jsou zrna dispergované fáze v matrix segregována, pokud žádné body jejich povrchu nejsou v dotyku, tj. podle předchozí úmluvy, pokud jsou vzdáleny více než $2 \Delta r$ (obr. 1). Zrna jsou v matrix agregována, jsou-li ve vzdálenosti rovné nebo menší $2 \Delta r$. Druhý případ může nastat teprve při nedostatku matrice pro vytvoření povlaku všech částic agregátu.

reprezentuje systém, tvořený pouze druhou fází (granulární; přitom nepřehlídíme, pro jednoduchost, k nutné porovitosti této fáze).

Makrodispersní materiály, jejichž struktura odpovídá právě pásmu systémů mezi uvedenými extrémny, se chovají při vnějším namáhání kvalitativně odlišně především podle toho, zda dispergovaná (tuhá) fáze je segregována nebo agregována. U systémů s agregovanou pevnou fází je pak rozhodující, zda tekutá fáze je přetržitá či spojitá, a dále, zda i matrice je přetržitá či spojitá, jinými slovy, jsou-li jejich infrastruktury jedno- či vícesvazné oblastí. Podle těchto hledisek lze rozdělit dispersní struktury - s běžným rizikem určitého zjednodušení - do čtyř základních typů.

Jednotlivé typy makrodispersního materiálu definujeme následujícím způsobem.

U materiálu prvního typu převažuje dispersní fáze, matrice, a zrna dispergované fáze jsou v ní segregována. V každé ze struktur této oblasti jsou zrna segregátu vzdálena vzájemně o více než Δr (obr. 2b), a platí

$$\sum_i a_n + \sum_j b_m = A + B = \Gamma, \quad n = 1, 2, \dots, i \quad (1)$$

$$m = 1, 2, \dots, j$$

kde a_n je částice dispergované fáze, b_m dispersní fáze, i, j počty těchto fází, A a B celkové sumy těchto fází v uvažovaném superstrukturálním systému Γ . Tato i další rovnice platí pro jakoukoli objemovou nebo hmotnostní jednotku systému Γ , s podmínkou, že tato jednotka je ještě superstrukturálním systémem.

Podle této zavedené nomenklatury platí pro první mezní systém (výchozí uvažovaný extrém)

$$\sum_i a_n = 0, \quad \sum_j b_m = B = \Gamma. \quad (2)$$

Tento systém tedy neobsahuje žádná dispergovaná zrna a "superstruktura" je tvořena jen částicemi dispersní fáze b_m (obr. 2a).

Druhý mezní systém vzniká, dosáhne-li dispergovaná fáze jako agregát maximální hustoty uložení a dispersní fáze zcela vyplňuje zbývající prostor k vytvoření kompaktního materiálu (obr. 2c). Pro tento systém platí dle předchozího

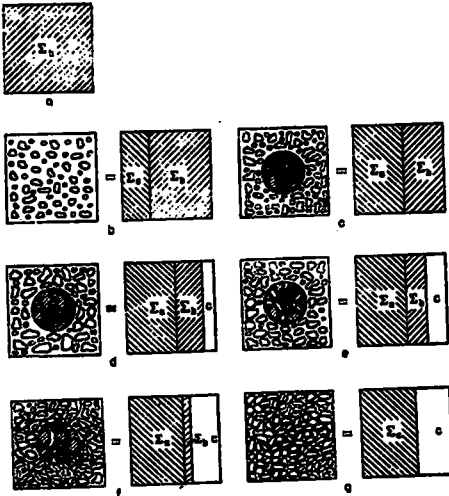
$$\sum_i a_n = A, \quad \sum_i a_{nf} = A_f, \quad \Gamma - \sum_i a_n = \sum_j b_m; \quad (3)$$

a_{nf} , A_f znamenají fiktivní hodnoty pro přičtení povrchově vázané vrstvy.

V superstrukturálních systémech prvního typu, jak patrně, není přítomna tekutá fáze, s výjimkou eventuální substruktury. Tekutou fází může eventuálně obsahovat jak plnivo, tak i matrice; pak však pokládáme tekutou fází za součást podstaty té které fáze, tudíž vstupující neměnně do analýzy mechanického chování systému. Materiály prvního typu jsou heterogenní materiály a technologicky jsou to plněná poliva.

U druhého typu, počínajícího druhým mezním systémem (obr. 2c), zůstává hustota uložení

Obr. 2 -



Dispergované systémy rúzného typu na príkladu prostredí o dvoch soustavách pevných fází: první soustavě Σ_1 (kvasihomogenní) přisuzujeme funkci matrice, druhé soustavě Σ_2 s funkcí dispergované fáze (s předpokladem granulární či partikulární struktury). Třetí fáze vstupující do systému je tekutá.

agregovaných zrn maximální a na úkor disperzní fáze přistupuje do superstrukturálního systému tekutá fáze (obr. 2d). Vyskytuje se zprvu v uzavřených prostorech, při zvětšování podílu této fáze vznikají spojení těchto prostor až dochází k jejich úplné komunikaci. Označíme-li částice tekuté fáze c_k , můžeme k podmínce druhého možního systému připojit ještě další charakteristiku této dolní hranice druhé oblasti

$$a_i \in \Gamma, \quad i = \max., \quad \sum_k^k c_k = 0. \quad (4)$$

Horní hranici představuje strukturální systém právě při dosažení spojitosti prostor zaujímaných tekutou fází, takže platí pro tento třetí možní systém (obr. 2e)

$$\sum_1^i a_n = A, \quad i = \max., \quad \sum_1^k b_m = B, \quad \Gamma - \sum_1^i a_n - \sum_1^k b_m - \sum_1^k c_k, \\ \sum_k^k c_k = C_s. \quad (5)$$

kde C_s odpovídá vzniku spojitosti tekuté fáze. Resuzováno změnou hustoty superstrukturálního systému je rozsah druhého typu poměrně úzký, vlastnosti těchto systémů se však rychle a značně mění s přibývajícím podílem tekuté fáze. Přitom, jak uvedeno, zůstává v každém případě hustota uložení agregátu a nezměněna a je maximální, a mění se pouze poměr matrice a tekuté fáze, takže

$$0 < C < C_s. \quad (6)$$

Třetí možní systém tvoří zároveň hranici mezi materiály co do pórovitosti. Materiály druhého

typu mají tekutou fázi nespojitou (přetržitou), jsou nespojitě poréšni, poréšita je uzavřená (s uzavřeným vnitřním objemem tekuté fáze).

Dalším snižováním podílu matrice v systému ve prospěch tekuté fáze za třetím mezním systémem se prohlubuje průlinčitá struktura. Materiály této třetí oblasti makrodispersních systémů jsou spoitě poréšni, porovitost je otvřená (s otevřeným vnitřním objemem). Hustota uložení dispergované fáze α se nadále nemění a pro popis systému tohoto typu platí stejné vztahy jako pro druhý typ, avšak

$$C_s \leq C \quad (7)$$

Vlastnosti materiálu tohoto typu jsou však výrazně závislé na okolním prostředí. Technologicky jsou materiály druhého a třetího typu pojenými plnivými. Horní hranici třetího typu tvoří čtvrtý mezní systém, pro který platí

$$\sum_1^i a_n = A, \quad \sum_1^i b_m = B_s, \quad \Gamma = \sum_1^i a_{mf} + \sum C_k \quad (8)$$

kde B je minimální množství disperšní fáze, potřebné k udržení konjugace agregátů. Znamená počátek čtvrté oblasti, kde ve struktuře se projevuje nedostatek disperšní fáze a v superstrukturním systému se objevují aglomeráty, mezi nimiž zůstává nanejvýš - v závislosti na okolním prostředí - kapalná fáze, jako sekundární disperšní fáze (obr. 2f). Superstrukturní soustava charakterizující původně pevný soudržný materiál přechází v soustavu se strukturou disjungovanou, materiál se stává partikulárním. Zatímco ještě ve strukturách třetího typu byla zrna α vzdálena vždy o Δr , u struktur čtvrtého typu je tato vzdálenost zachována pouze uvnitř aglomerátů a mezi jednotlivými aglomeráty - a postupně až zrna - se redukuje k nule.

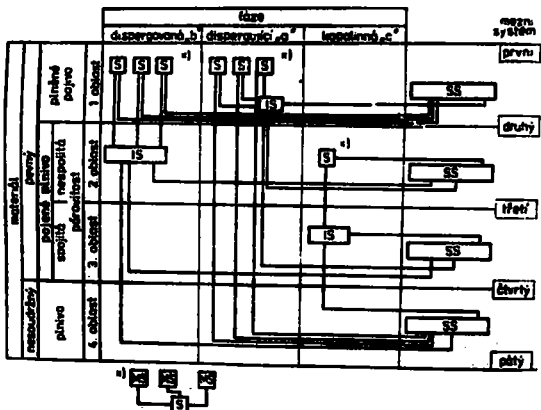
Horní hranici čtvrtého typu je pátý mezní systém, ve kterém disperšní pevné fáze zcela chybí (obr. 2g) a reprezentuje druhý extrém, ve kterém superstrukturní systém obsahuje pouze dispergovanou fázi. Platí zde

$$\sum_1^i b_m - \sum_1^i (a_{mf} - a_m) = 0 \quad (9)$$

$$\Gamma = A + C$$

ať již je C kapalná nebo plynná fáze. Materiály tohoto systému jsou vysloveně partikulární. Částice původní matrice přitom mohou být ve struktuře obsaženy, ovšem pouze jako zrna nebo součásti zrn, bez plnění předpokládané funkce pojení zrn mezi sebou, tj. z fáze disperšní se stala rovněž dispergovaná.

Schematicky je znázorněna klasifikace makrodispersních systémů spolu s logickým zařazením zavedených pojmů na obr. 3. Je pochopitelné, že ač byle ve výkladu použito představy jedné disperšní, jedné dispergované a jedné tekuté fáze, mohou (podle definice) ve skutečnosti každá znamenat více fází téže funkce.



Obr. 3 - Klasifikace a uspořádání superstrukturních systémů

- MS - mikrostruktura (substance)
 - S - struktura
 - IS - infrastruktura
 - SS - superstruktura
- } fází materiálu

Československá společnost pro mechaniku při ČSAV, texty přednášek semináře Kompozitní materiály, Praha, 19. 2. a 19. 3. 1981, pod vědeckou redakcí akademika J. Němce

Vydala Československá společnost pro mechaniku při ČSAV, Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2, ČSSR

Výtisk TOMOS, závod 500, Praha 1, Nové Město, Krakovská 25

Publikace obsahuje 140 stran, 122 obrázků, 14 tabulek

Náklad činí 300 výtisků