

Československá společnost pro mechaniku při ČSAV

# KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Texty přednášek ze semináře "Kompozitní materiály", pořádaného ČSM 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

## TVORBA A UŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Richard A. Baroš

Je důležité rozumět, co je míněno kompozitem, jak jej můžeme definovat. Kompozitem dnes nazýváme každý materiálový systém, který je složen z více fází, z nichž alespoň jedna je pevná, a makroskopicky rozzeatelným rozhraním.

Hlavním určujícím faktorem kompozitu je jeho superstruktura - používáme toto označení k odlišení struktury fází, jež ovlivňuje situaci zejména na vnitřním rozhraní. Mezi fázová hranice, a tedy specifický vnitřní povrch, daný celkovou stykovou plochou fází v jednotce objemu, je druhý rozhodující faktor a to kvantitativně i kvalitativně. Navíc přistupuje další faktor - vnitřní napjatost ať už primární (jako vlivem tuhnutí a tvrdnutí) nebo sekundární (vlivem vnějšího namáhání).

Výraz mikrostruktura si ponecháváme pro popis strukturního uspořádání substance, látky, tedy např. polykrystalu. Navíc se ještě setkáváme s pomocným výrazem infrastruktura, kterým popisujeme strukturní uspořádání jedné fáze v kompozitu po myšleném odstranění všech ostatních fází. Vezmeme-li např. beton: jeho strukturní uspořádání popisuje superstruktura, jež je složena z infrastruktury pojiva (matrix), infrastruktury tekuté fáze a infrastruktury dispergované fáze. Pojivo je složeno z řady minerálů, ve vlastní struktuře a každý minerál má vlastní mikrostrukturu. Totéž platí i o každém zrně dispergované fáze. Stejně i třetí infrastruktura (póry) může být tvořena plynem nebo kapalinou, která může být například roztokem s vlastní strukturou. Při studiu mechanického chování materiálu nás obvykle při strukturním hodnocení nezajímá mikrostruktura látek, a výjimkou hodnocení mezi fázových interakcí.

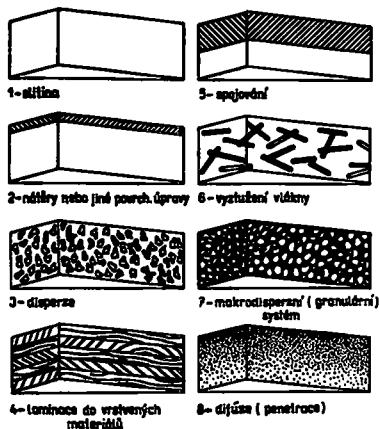
Jasně existuje velký počet superstrukturních systémů, od soustav s jednou spojitou fází a jednou nebo více dispergovaných fází (tzv. systémy jednostrukturní, k systémům se dvěma nebo více spojitými fázemi, z nichž každá může obsahovat jednu nebo více dispergovaných fází (tzv. systémy dvou- nebo vícestrukturní). Obvykle vícestrukturnost v tomto smyslu přináší výrazně lepší výsledky ve vlastnostech kompozitu.

Jednotlivé fáze ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu jednak svými vlastními charakteristikami, jednak - a to je důležité - jejich vzájemnou interakcí nebo interakcí struktur, jak pevných, tak tekutých. Tyto interakce jsou převážně fyzikální nebo fyzikálně-chemické, ale nejsou vyloučeny ani interakce chemické. Interakce jednotlivých fází a struktur přináší právě nové kvality materiálu, jež nemohou být dosaženy žádnou složkou samostatně. Lze dosáhnout toho, že jsou zdůrazněny výhodné vlastnosti složek a potlačeny jejich nevýhodné vlastnosti podle potřeb navrhovaného prvku nebo konstrukce. Většinou je v kompozitu nepřehlednětelná interakce s prostředím

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

a souvislost se způsobem výroby a použití, např. mechanického namáhání.

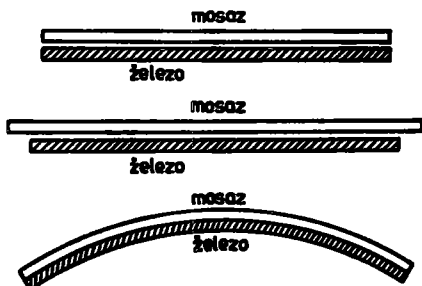
Tyto materiály nejsou nikdy univerzální a jsou navrhovány výhradně pro jisté použití při maximální exploataci hmoty. To je činí ekonomicky a energeticky výhodné a je základem jejich převahy v konkurenci s homogenními (tradičními) materiály. Několik příkladů kompozitních systémů je ukázáno na obr. 1.



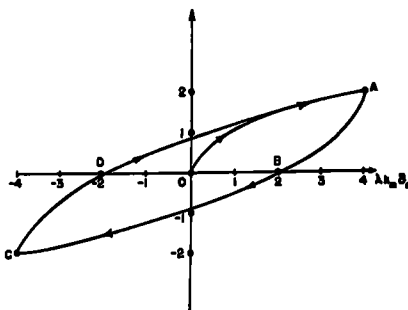
Obr. 1 - Místo přizpůsobování jednoho materiálu inženýrovým potřebám jsou vytvořeny vhodné materiálové systémy řadou kompozitů. Jsou naznačeny různé cesty složení dvou nebo více materiálů k vytvoření kompozitu. Techniky již dlouho používané jsou vlevo; způsoby napravo jsou relativně nové.

Základním, téměř klasickým příkladem kompozitního působení je známý bimetalický článek. Při změně teploty dvou spojených kovů s různými součiniteli tepelné roztažnosti dochází vzájemným působením k ohýbání celého prvku (obr. 2).

Předpokládáme nyní, jako další příklad, jedno vlákno vložené ve směru namáhání do matrix s nižším modulem; předpokládáme dále, že zatížení působí jen na matrix, že obě složky se přetvářejí jen lineárně a že vzájemné spolupůsobení obou částí je dáno pouze adhezí simulovanou Coulombovým třením. Napětí se přenáší třením na styku od konce vláken s nulovým napětím tak dlouho, dokud tahová přetvoření v matrix a vláknu nebudou stejná. Ve střední části kompozitu bude napětí konstantní, obě části se budou přetvářet bez vzájemného posuvu. Pracovní diagram takového systému je na obr. 3 a je vidět, že systém se chová nelineárně, i když je složen z lineárních složek. V jisté fázi při odlehčení začne být vlákno tlačeno, i když je systém ještě tažen, systém zůstává při nulové síle přetvořen. Při snižování tlaku a růstu tahu systém přejde do původního bodu a dalším cyklováním bude opakovat původní křivku. Disipovaná energie je určena plochou hysterese křivky, přitom část disipační energie na mezifázovém kontaktu je 1 - 3 x větší než disipační energie vlivem vlastností obou materiálů samých. To je další typický, jednoduchý příklad kompozitního působení.

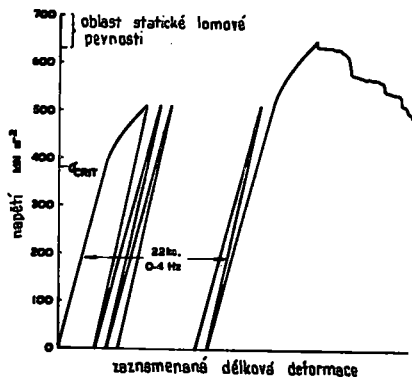
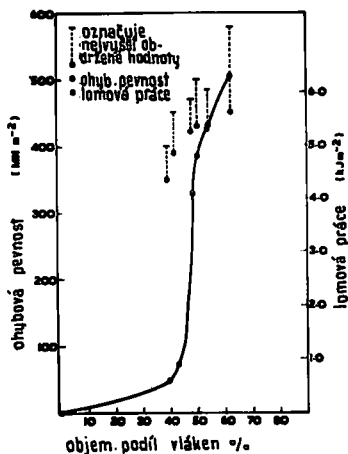


Obr. 2 - Princip kompozitu používaný bimetalickým páskem demonstrován v termostatech.



Obr. 3 - Pracovní diagram kompozitního materiálu při cyklickém zatížení tah - tlak.

Jednosměrným vyztužením křehké matrice, např. skla, ocelovými vlákny (18 % hm.) se dosáhne zvýšení pevnosti cca 10 x především jako důsledek vnitřní tlakové napjatosti od výroby vlivem rozdílu součinitelů teplotní roztažnosti. Ještě podstatnější je zvýšení houževnatosti. Například složením 30 % obj. náhodně uspořádaných uhlíkových vláken o průměru 8 mikronů 3 mm dlouhých, se zvětší lomová práce z původních cca 3 J/m<sup>2</sup> na 455 J/m<sup>2</sup>, přičemž nedochází k náhlému zlomu, ale porušení postupuje postupně, s větší deformací. Jiný příklad: při vyztužení borosilikátového skla (Pyrexu) spojitými vlákny (60 % obj.) bylo prokázáno, že vedle ohromného zvětšení lomové práce až 2 000 x, při zvýšení chybové pevnosti cca 6 x, se významně změnil i pracovní diagram a chování při únavě (obr. 4). Při cyklickém zatěžování nad mez, při které vznikají trhliny v matrix, se pevnost podstatně nezměnila po 22 000 cyklech zatížení; pracovní diagram, zakřivený po prvním zatížení (při vzniku trhlin v matrix), zůstával již lineární (obr. 5).



Obr. 4 - Změna ohybové pevnosti a lomové práce s obsahem vláken pro Pyrex vyztužený průběžnými vlákny.

Obr. 5 - Účinek cyklického zatěžování Pyrexu vyztuženého uhlíkovými vlákny na napětí, při kterém je matrix již porušena.

To vše jsou opět typické příklady kompozitního působení: lze tedy získat pevné a přitom houževnaté materiály vyztužením křehké matrice s nízkým mezním přetvořením křehkými vlákny.

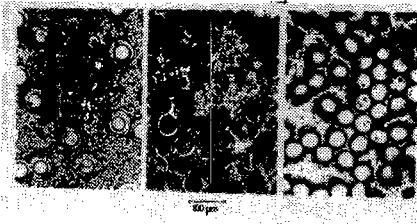
Obdobně kombinování křehké matrice (například syntetické pryskyřice) s některým pružným granulárním plnivem (např. pryží) lze získat materiál pevný a trvale pružný, s vysokým mezním přetvořením. Naopak, tuhé plnivo ve viskózní matrix působí jako vnitřní složka, která omezuje a zpomaluje jednak elastické deformace, hlavně ale viskózní tok spojitě struktury.

Jiný, již klasický příklad kompozitního působení je pryž; elastomery po příčném zesílení mají pevnost něco přes 20 kg/cm<sup>2</sup>, avšak po přimíšení cca 20 % vyztužujícího plniva  $\varnothing$  20-30 mikronů (v daném případě sazi) se zvýší pevnost asi 12 x na 250 kg/cm<sup>2</sup>, a to bez změny mezního přetvoření. Hlavní příčinou tohoto účinku je disipace energie na mezíploše plnivo-elastomer; posunutí jednotlivých řetězců po povrchu sazi (tzv. pohyblivá absorpce) umožňuje, že do akce se dostanou postupně všechny nebo většina řetězců v jednotce průřezu na rozdíl od neplněného elastomeru, kde dochází k postupnému přetrhávání nejvíce namáhaných řetězců, jež jsou vždy různé délky. Tento mechanismus vysvětluje i tzv. napětové měknutí, tj., že materiál se stává měkčí po jednom nebo více napětích (řetězce jsou již posunuty, tedy uvolněny). Plnivo samo zde nepřináší přímo nějaký podstatný příspěvek svou pevností nebo tuhostí.

Těchto několik příkladů kompozitního působení ukazuje, že úloha jednotlivých složek v systému může být velice rozličná.

Tak například pro dosažení vysoké pevnosti je žádána vysoká soudržnost fází, pro dosažení vysoké houževnatosti stačí v důsledku disipace energie a tlumení na mezifázových diskontinuitách i slabá soudržnost. Velmi pevná a vysokomodulová vlákna přinášejí pevnost a tuhost, jsou-li v dostatečné tvárné matrix, nízkomodulová vlákna s vysokým protažením přinášejí vysokou absorpci energie a rázovou pevnost. V některém případě je prospěšná existence mezivrstvy mezi fázemi, v jiném je vyložena škodlivá.

Kolem okrajů inkluzí existuje vždy koncentrace napětí. Proto obvykle hranice fází jsou v pružném oboru nejslabším místem a snahou je, aby hranice byla podajnější než tužší z obou sousedních fází. Někdy je hranice ovlivněna tendencí obou složek reagovat chemicky a tvořit mezifázi. Například hliník - ocel vytváří mezikovovou fázi  $AlFe_x$ , která je křehká a její tvorbu je třeba zabránit vhodným technologickým postupem (obr. 6).<sup>x</sup> y Čím tenčí je tato zóna, tím lepší je lomová houževnatost.

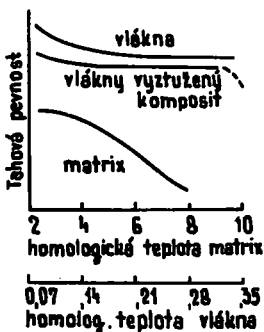


Obr. 6 - Reakce mezi kovovými vlákny a hliníkovou matrix a vytváření  $AlFe_x$  - zón, které mohou zlepšit nebo zhoršit soudržnost.

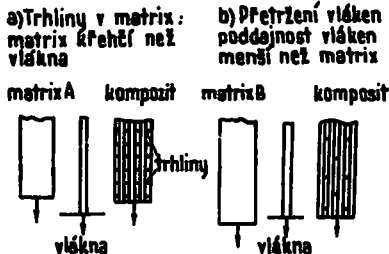
Jaké účinky přináší příměs různých plniv do polymerní matrice ukazuje tabulka (obr. 7 - viz další strana). Důležitá je především tvarová stálost, zvláště během výroby, což dává možnost výroby přesnějších výrobků bez následného opracování, zvýšení tuhosti a tím vším (včetně snížení množství polymeru fáze) snížení ceny. Zvláště výhodná je kombinace dvou nebo tří druhů plniv.

Jiná důležitá oblast je systém termoplast - plyn k vytváření různých typů tzv. pánových, lehčených systémů, zejména v kombinaci s hutným materiálem, tedy vytváření tzv. hybridních kompozitů, jež jsou v poslední době předmětem zvýšeného zájmu, tedy vlastně soustav kompozitů s různými vlastnostmi, většinou s jejich plynulým přechodem (opět klasické příklady hybridních kompozitů poskytuje příroda - např. dřevo s větší přetvárností na okraji než uprostřed průřezu apod.).

Kontrola rozvoje trhlin může být považována za jeden z hlavních přínosů kompozitů. Tak například kompozitům vyztuženým vlákny přináší houževnatost vedle samotné pevnosti vláken především dva mechanismy absorbující energii, spojené s vývojem trhlin. Několik mechanismů porušování je na obr. 8 a, 8 b, 9 a 10 (poslední dva na dalších stranách). Energie je absorbována



Obr. 8 a - Schematické srovnání tahové pevnosti a jeho složek jako funkce homologické teploty.



Obr. 8 b - Poměr mezního přetvoření vláken a matrix v kompozitu určuje pevnost.

Účinek plniv na vlastnosti polymerů

	Chemická odolnost	Tepečná odolnost	Elektrický izolační odpor	Rázová pevnost	Tahová pevnost	Rozměrová stabilita	Tuhost	Tvrdoost	Kluzkost	Elektrická vodivost	Teplotní vodivost	Odolnost k vlhkosti	Zpracovatelnost	Doporučeno pro užití v a
Kysličník hlinitý, destičkovitý	x	x				x								S/P
Kysličník hlinitý, trihydrát			x				x							P
Jemné částice														
Hliníkový prach														
Asbest	x	x	x	x			x	x						S/P
Bronz							x	x		x				S
Uhlíčitán vápenatý (vápenec) <sup>b</sup>		x				x	x	x		x			x	S/P
Meta-křemičitán vápenatý	x	x				x	x	x				x		S
Křemičitán vápenatý		x				x	x	x						S
Saze		x				x	x	x		x			x	S/P
Uhlíková vlákna										x	x			S
Celulóza					x	x	x							S/P
Alfa celulóza			x		x	x		x						S
Práškové uhlí	x											x		S
Bavlna (vyluhovaná sekaná vlákna)			x	x	x	x	x	x						S
Skleněná vlákna	x	x	x	x	x	x	x	x				x		S/P
Jedlová kůra													x	S/P
Grafit	x				x	x	x	x	x	x				S/P
Juta				x			x	x						S
Kaolin	x	x	x			x	x	x	x			x	x	S/P
Kaolin (vypálený)	x	x	x			x	x	x				x	x	S/P
Slída	x	x	x			x	x	x				x	x	S/P
Sírník molybdeničitý					x		x	x				x	x	P
Nylon (vyluhovaná sekaná vlákna)	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	S/P
Orlon	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	S/P
Rayon			x	x	x	x	x	x						S
Kysličník křemičitý			x									x	x	S/P
Sisálová vlákna	x			x	x	x	x	x				x		S/P
TFE-Fluorokarbon									x					S/P
Mastek	x	x	x			x	x	x	x			x	x	S/P
Dřevitá moučka			x		x	x								S

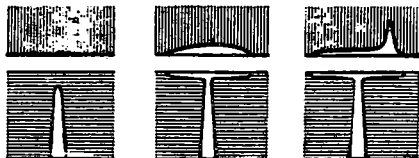
x Vlastnost zlepšena

a Symboly : P - termoplast

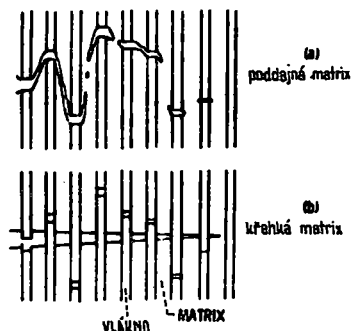
S - termoset

b V termosetech je hlavní funkce zlepšit vzhled

c Hlavní funkce je zvýšit odolnost k UV záření



Obr. 9 - Model rozvoje trhliny

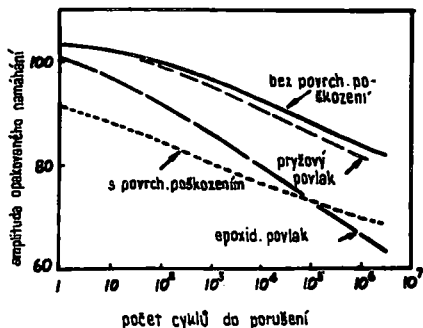


Obr. 10 - Rozvoj trhliny v kompozitech s matrix různě podajnosti

za prvé vytahováním vláken z matrix, za druhé oddělováním vláken od matrix jako důsledek stáčení trhlin podél styku. Navíc účinkem rozptýlení pevných jednotek systému do vláken a jejich spolupráce s matrix je ojedinelé porušení vláken nepodstatné pro únosnost systému. Matrix plní vedle toho důležitou úlohu ochrany výztuže od vnějšího prostředí a povrchového poškození.

Rovněž postupnou delaminací vícevrstevných vláknitých systémů (např. prepregů) je výborně absorbovaná energie, čímž se dosahuje vysoké odolnosti nárazům náboje, kamene apod. (obr. 11).

Důležitá je relativní necitlivost kompozitu k povrchovému poškození; například u kompozitu grafit - polyester je snížení pevnosti jen cca 15 %. Význam na únosnost při únavě má i druh povrchové úpravy kompozitu.



Obr. 11 - Amplituda namáhání proti počtu cyklů do porušení při tah - tlak ohybu pro grafit - polyester kompozit bez a s poruchovým poškozením úderem kamene a se dvěma ochrannými povlaky. Stojí za povšimnutí, že nad  $10^5$  cyklů vzorek i s tvrdým epoxidovým povlakem byl horší než vzorek bez povlaku.

V některých kompozitech převažuje vliv anisotropie, v jiných strukturnost, i když zákony spolupráce v kompozitech platí obecně, jak v partikulárních, tak vláknitých systémech.

Důležitý je vzájemný poměr součinitelů teplotní roztažnosti složek. Někdy může být prospěšný velký rozdíl ke vnášení výhodného předpětí, jindy je vhodný co nejmenší rozdíl.

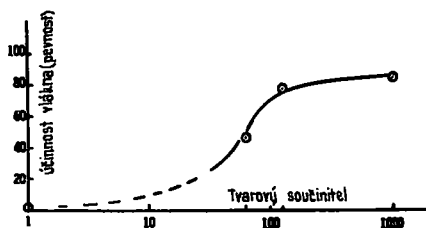
U kompozitů s rozptýlenou vláknitou výztuží musí výztuž, aby byla užitečná, mít tvarový součinitel (délka : průměr) nad minimem, tj. nad 50 - 100 (obr. 12, 13 - viz další strana).

Můžeme se nyní ptát, které jsou hlavní parametry, na nichž závisí vlastnosti kompozitu. Jsou to především:

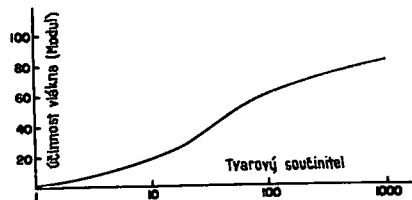
- vlastnosti fází (včetně tekuté fáze - Póry), tj. mechanické vlastnosti a jejich poměr (pevnost, modul, Poisson, prac. diagram, mezní přetvoření) anisotropie vlastnosti jednotlivých fází,

- obdobové zastoupení fází a jejich geometrické uspořádání v systému včetně pórů, tj. například

množství, orientace a průměrné vzdálenosti dispergované fáze,

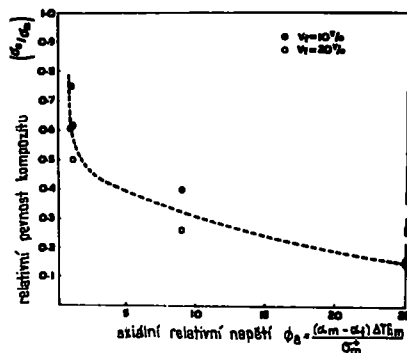


Obr. 12 - Účinnost vlákniny (na pevnost) proti tvarovému součiniteli pro různosměrně orientovaná nespojitá vlákna v epoxidové matrixi



Obr. 13 - Účinnost vlákniny (na modul pružnosti) proti tvarovému součiniteli pro různosměrně orientovaná nespojitá vlákna v epoxidované matrixi

- interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku, tedy schopnost přenosu zatížení z matrixi do vyztužujících částic a naopak, jinými slovy soudržnost na kontaktu fází. Soudržnost závisí do značné míry i na poměru součinitelů teplotní roztažnosti: je-li rozdíl  $(\alpha_m - \alpha_f)$  pozitivní, je matrixi tažena, je-li negativní, má vložená fáze snahu oddělit se od matrixi při snížení teploty. Významný vliv mají viskoelastické vlastnosti styku i anisotropie vložených částic (např. součinitel teplotní roztažnosti); uhlíková vlákna mají například součinitel teplotní roztažnosti ve směru vláken  $\alpha_f = 0$ , kolmo na směr  $\alpha_f = 8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,
- interakce s okolním prostředím,
- časové faktory, zahrnující historii vzniku materiálu i fází, technologii výroby (např. teplotu solidifikace, tj. stavu, od kterého již vznikají napětí od změny teploty, zmrážená teplotní tahová napětí v matrixi (obr. 14), proměna modulu s teplotou), technologie zpracování, rychlost změny vnějšího namáhání, okolních podmínek atd.



Obr. 14 - Pevnost kompozitů s náhodně orientovanými nespojitými vlákny jako funkce podélného teplotního relativního napětí.

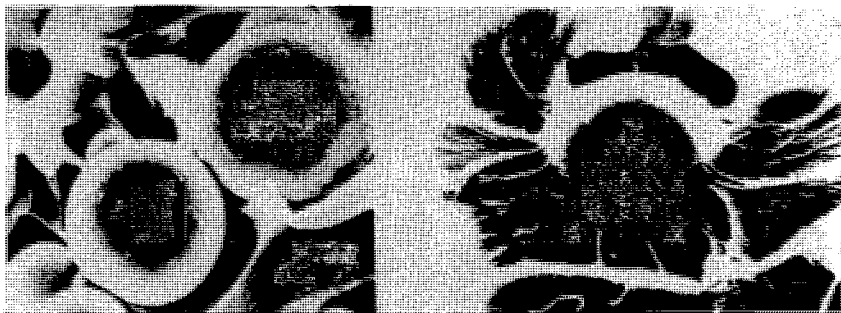
- $\phi_a$  - ukazuje snížení pevnosti kompozitu s růstem rodového napětí
- $\Delta T$  - snížení teploty pod bodem zgelování při chladnutí ve výrobě
- $E_m$  - modul matrixi při konečné teplotě
- $\alpha_m, \alpha_f$  - průměrný součinitel teplotní roztažnosti v daném oboru teplot.

Samozejmě, že při bližším zkoumání zjistíme, že určité vlastnosti závisí na dalších parametrech, například rázová pevnost na efektivní délce vlákniny, na průměru vláken, na smykové pevnosti matrixi, ale také na uspořádání zkoušky, velikosti tělesa a na typu vláken.

Velikost koncentrace napětí na hranicích závisí na objemovém poměru fází, poměru modulů, Poissonových součinitelů, způsobu vnějšího namáhání. Tloušťka obalové vrstvy závisí na teplotě

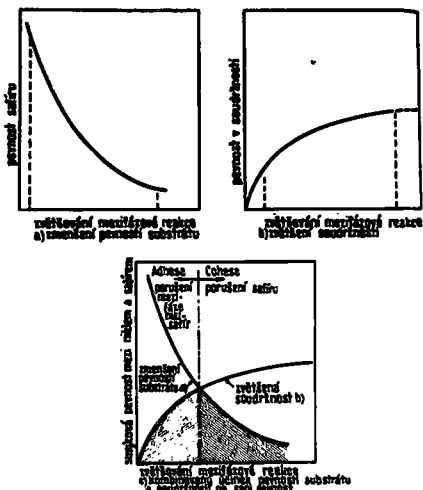


a viskozitě matrix, tlaku, povrchových vlastnostech inkluzí, společné adhezi a povrchovém napětí matrix. Pokrytím inkluzí některým síťujícím činidlem se výrazně sníží stykové napětí fází a zvýší soudržnost - vlastně zvýšení kompatibility (obr. 15, 16). Úpravou mezifázové re-



Obr. 15 - Povrch skleněných kuliček v epoxidové matrix bez síťujícího činidla. Obr.16 - Povrch skleněných kuliček v epoxidové matrix se síťujícím činidlem.

akce obvykle dojde vedle zvýšení soudržnosti současně ke snížení pevnosti substrátu. Je proto nezbytné omezit chemické reakce na mezipovrchu fází tak, aby se získalo maximální zvýšení soudržnosti při minimálním znehodnocení substrátu (obr. 17).



Obr. 17 - Schematické znázornění účinku mezifázových reakcí na pevnost v součrtnosti systému nikl - safír.

Z uvedeného vidíme, že s kompozity souvisí celá řada vědeckých disciplin: metalurgie, keramika, technologie skla, technologie polymerů a jiné materiálové technologie, chemie, fyzikální chemie, chemie polymerů, fyzika, mechanika, matematika, biologie. Je jen přirozené, že každá věda přináší svoje přístupy, svoje hlediska, svoje realizační úrovně, svoji terminologii. A tak přesto, že kompozity studuje mnoho rozličných pracovišť, je mnohdy obtížné se navzájem dorozumět. Přírodním cílem by mělo být stanovit zobecnění, která jsou platná pro různé typy kompozitních materiálů. Protože jde v podstatě o přetvářející se systémy, v nichž vlastnosti materiálu jsou vázány na jeho strukturu, může takový sjednocující pohled dát patrně pouze mechanika, i když přínosy ostatních vědních disciplín jsou přítom nepostradatelné.

Vnější charakteristiky kompozitů, se kterými má smysl pracovat, jsou především specifické vlastnosti, jako specifická pevnost (poměr pevnosti k hmotnosti), specifický modul (poměr modulu k hmotnosti), specifický vnitřní povrch (poměr kontaktních povrchů k objemu dispergovaných částic) atd.

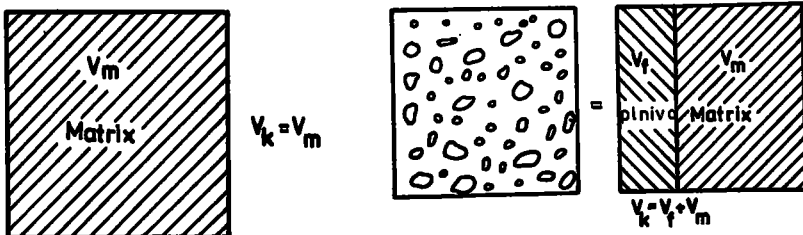
Rozdělení kompozitů je možné z různých hledisek, např. z hlediska materiálového (podle matrix) - kompozity kovové, polymerní, keramické, nebo z hlediska technologického (výrobního), nebo z hlediska mechanického, které je základní pro popis vlastností a chování kompozitu.

Na první pohled se zdá, že nějaké rozřídění u tak rozmanitých systémů je jen těžko možné. Avšak hlubší pohled do mechanismu přetváření a porušování jednotlivých struktur ukázal, že takové rozřídění je nejen možné, ale zcela nezbytné, chce-li se dospět ke zvládnutí cílené tvorby a předpovědi vlastností kompozitu.

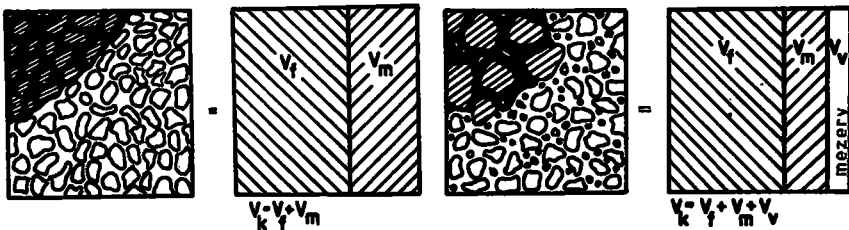
Základní hledisko je, zda-li do matrix vložena druhá (dispergovaná) fáze je segregovaná, tj. není ve vzájemném přímém kontaktu, nevytváří vlastní strukturu, je v některém směru fázově nespojitá, či je-li naopak agregovaná, tj. jednotlivé její součásti jsou v přímém kontaktu, vytváří případně vlastní strukturu a je fázově spojitá.

Existuje celá řada různých soustav úplně vyplňujících daný prostor, od čisté matrix (tedy homogenního systému) - obr. 18 - přes rozptýlené částice (obr. 19) až k systému s dispergová-

Obr. 18 - 23 - Základní modely kompozitních systémů:

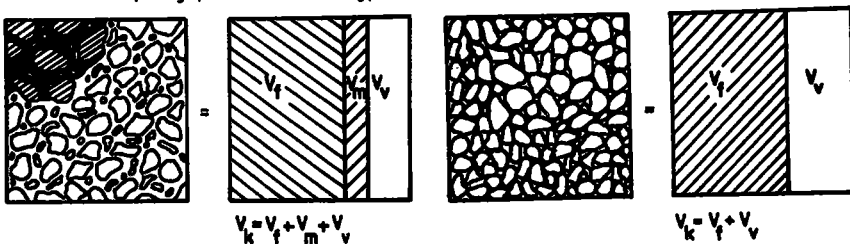


Obr. 18 - První mezní systém (pouze matrix) Obr. 19 - Kompozit prvního typu



Obr. 20 - Druhý mezní systém oddělující kompozity prvního a druhého typu

Obr. 21 - Kompozit druhého typu (nespojité tekuté fáze)



Obr. 22 - Kompozit třetího typu (spojité tekuté fáze)

Obr. 23 - Třetí mezní systém (bez matrix)

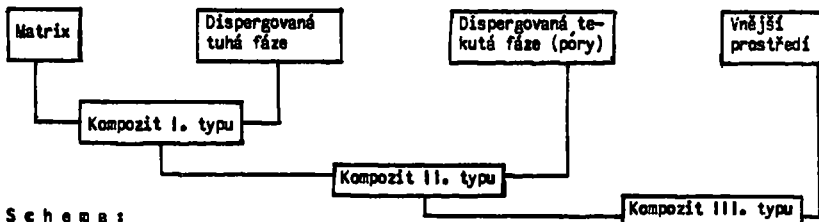
nou fází v nejhutnějším možném uspořádání (obr. 20), u nichž určující složkou vlastností je matrice. Celou tuto skupinu soustav lze označit - z mechanického hlediska - za kompozity I. typu. Experimentální výzkum takových soustav, velmi široký a rozmanitý ve svém objemu, dal výsledky různorodé a byly z nich vyvozeny závěry mnohdy i protichůdné. Nejčastěji byl sledován vliv zvyšujícího se množství dispergované fáze v matici na pevnost.

Přecenování otázky pevnosti (obvykle tahové) při posuzování kompozitů je sice časté, ale obecně škodlivé, často zcestné. Závěry o hodnotě materiálu posuzovaného z hlediska krátkodobé pevnosti mohou být např. po několika cyklech střídání teplot zcela opačné. Kromě toho není mnohdy rozhodující, zda krátkodobá pevnost je např. o 30 % nižší nebo vyšší, ale jaké jsou jiné, například přetvárné nebo fyzikální vlastnosti výsledného materiálu. Jde o to, jak vzniklý systém je schopen disipovat dodanou energii, utlumit nebo lokalizovat mikroporuchy, zabránit jejich šíření atd.

Bylo již řečeno, a nyní zdůrazňuji, že kompozity I. typu vyplňují zcela beze zbytku prostor, který zaujímají. Od konečného (hraničního) kompozitu I. typu nelze již měnit objem dispergované fáze v daném tělese (dispergovaná fáze zůstává agregována) a další změna poměru objemu obou tuhých fází je možná pouze redukcí matrice, na jejíž místo vstupuje do systému fáze třetí, tekutá (obr. 21). V matici vznikají uzavřené pory a celkový poměr objemu pevné fáze k objemu tělesa se zmenšuje. Vzniká systém nejméně třířázový, jehož veškeré vlastnosti se diametrálně počínou odlišovat od systémů předchozích. Kompozity tohoto druhu tvoří další samostatnou skupinu, kterou můžeme označit jako kompozity II. typu. Teoreticky končí tato oblast systémem, u kterého se třetí, tekutá fáze spojí a vytvoří samostatnou infrastrukturu, čímž systém je kontinuálně spojen s vnějším prostředím (obr. 22). Prakticky ovšem tato hranice nemůže být ostrá, neboť ke spojování jednotlivých uzavřených porů do spojitých kanálků dochází postupně. Pevná fáze na rozdíl od I. typu v těchto systémech nezaujímá celý prostor vymezený materiálem. Je-li tekutá fáze ve vakancích matrice plynná, je snadno stlačitelná, je-li kapalná, je zcela nestlačitelná. Primární vnitřní napjatost systému, stejně jako sekundární vnitřní napjatost je se vznikem vakancí jiná, jiná je disipace energie atd. Materiál v případě zaplnění porů plynnou fází (což je nejobvyklejší) má větší možnost se vnitřně přetvářet bez vzniku mikroporuch a vzniklé mikroporuchy jsou brzo lokalizovány; disipace energie je výraznější. Vnější projevem těchto vlivů je např. změna pevnosti, jak krátkodobých, tak zejména dlouhodobých, zvýšení rázové pevnosti a únavové pevnosti, zvýšení životnosti a snížení citlivosti ke změně vnějších podmínek (např. teploty). V parametrech, určujících výsledné vlastnosti, se kromě činitelů, které se uplatňují u kompozitů I. typu (poměru objemu a vlastností tuhých fází, specifické plochy dispergované fáze) objevuje další parametr: poměr tekuté a pevné fáze.

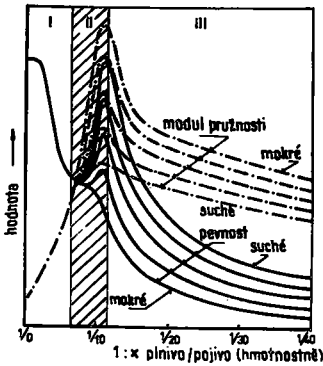
Jakmile pórovitost systému se stane spojitou (aniž by se měnilo uspořádání dispergované fáze, jež zůstává trvale v agregovaném stavu jako na počátku kompozitů II. typu), uplatní se další veličina (často rozhodující): vnitřní interakce kompozitu s vnějším prostředím. To opět rozhodujícím způsobem mění chování systému, jež je charakteristické pro kompozity III. typu (obr. 22). Dalším nezbytným parametrem, bez něhož se popis těchto systémů neobejde, je tedy vnější prostředí. Pevná fáze zaujímá stále menší část celkového (vnějšího) objemu kompozitu, ubývá matrice až do okamžiku, kdy se prvotní struktura matrice rozpadá a materiál se stává sypkým, nesoudržným (obr. 23).

Schematicky můžeme znázornit základní rozdělení kompozitů podle dalšího obrázku; teprve bude-li jejich výzkum, popis i experimentální sledování podle toho děleny, máme naději dobrat se jednoznačným výsledkům.



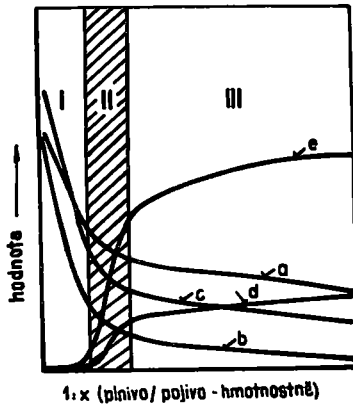
Schema :

Pozorujeme-li vlastnosti kompozitů různého typu (např. v závislosti na změně poměru hmotností matrix a dispergované fáze (plniva) v jednotce objemu kompozitu, můžeme jednoznačně nalézt markantní změnu v oblasti druhého, někdy též zvaného přechodového typu (obr. 24, 25).



Obr. 24 - Průběh pevností a modulů pružnosti různých kompozitů

whiskery, tj. vysoce pevné jednotlivé krystaly s poměrem délky k průměru nad 20 - 25; ve formě whiskerů bylo již připraveno více než sto materiálů z kovů oxidů, karbidů, halidů, organických sloučenin atd., nejčastěji je dodáván silikon-karbid a aluminium-oxid (viz obr. 26, 27, 27 a, 28, 29).



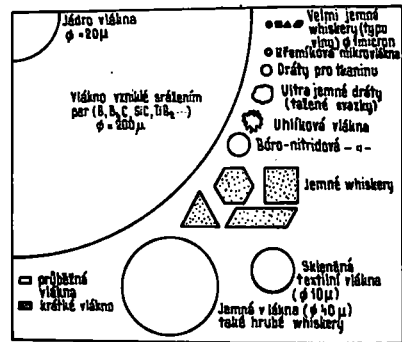
Obr. 25 - Průběh některých fyzikálních veličin různých kompozitů:  
a) součinitel teplot.roztažn.  
b) smrštění  
c) mezní přetvoření  
d) vlhkost. součinitel  
e) porositá

Každý z uvedených tří typů kompozitů může být quasiisotropní nebo anisotropní, i když převážnou měrou anisotropní kompozita mají praktický smysl jen u typu I.

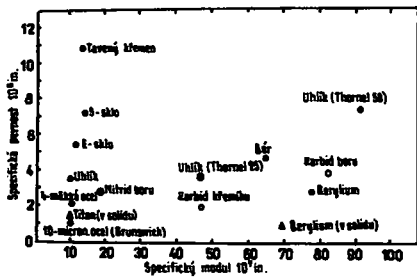
Každý z uvedených tří typů kompozitů může být složen ze dvou nebo více pevných fází, a u každého z nich může být tvořen jednou nebo více spojitými strukturami, tedy strukturami, jež jsou schopny samostatné existence.

Podívejme se ještě na několik příkladů konkrétních kompozitů. Pro matrix lze použít téměř všechny kovy (magnesium, ocel, litinu, hliník, měď, různé slitiny), keramické a skelné materiály (alkalické sklo, borosilikátové sklo, lithium-alumino-silikátové sklo), plasty (termoplasty i termosety).

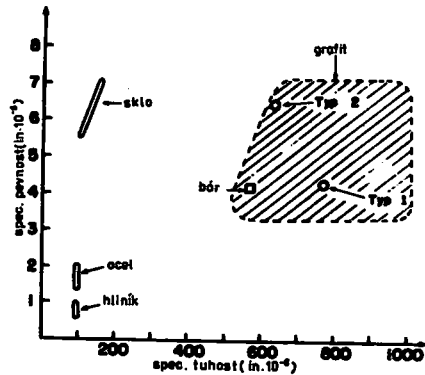
Pro vlákna lze opět použít celou řadu materiálů, z nichž již běžně vyráběná a dodávaná jsou vlákna skelná, beryliová, z uhlíkové oceli, z maragingové oceli, wolframová, grafitová, boronová, atd., v poslední době i organická (PRD-49, Kevlar), nebo



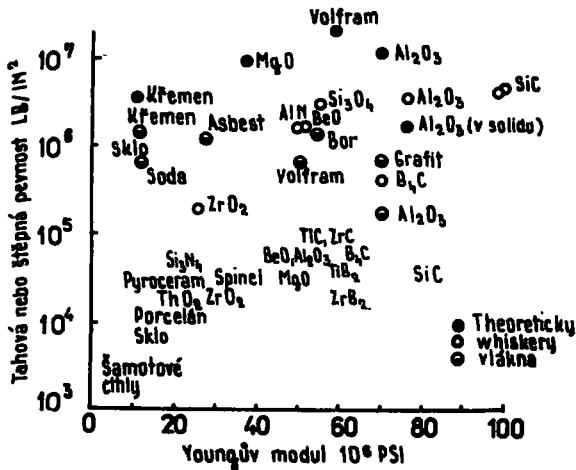
Obr. 26 - Relativní průřezová plocha a tvar některých vláknitých výtuzí



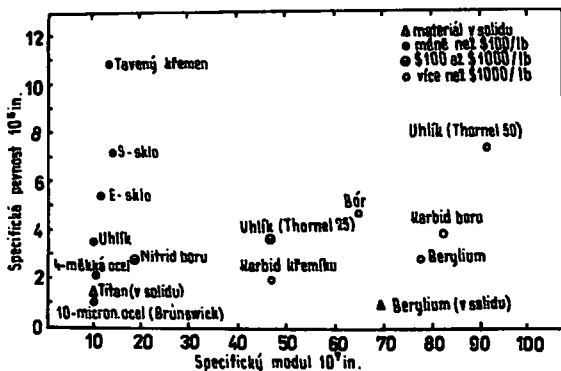
Obr. 27 - Závislost specifické pevnosti a modulů pružnosti pro experimentální a výrobní spojité vlákna



Obr. 29 - Relativní charakteristiky vláken

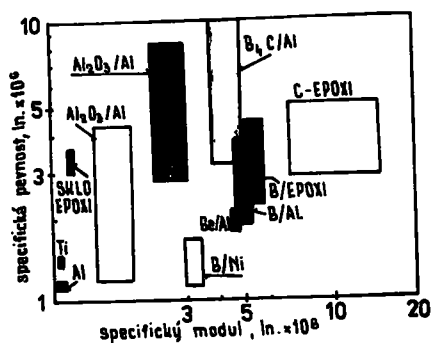


Obr. 27 a - Reprezentativní vztahy pevnosti a modulů pružnosti různých keramických materiálů ve formě polykryсталického solidu vlákna a whiskery

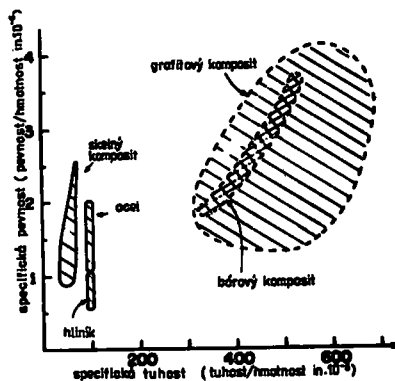


Obr. 28 - Cenové relace různých spojitých vláken

Kombinace matrix, vláken a partikulárních příměsí je rozsáhlá a zahrnuje nesmírné množství kombinací, např. kompozity WC-Co, WC-(Fe-17Ni-10Co), WC-FeNi (vysokopevnostní slitiny oceli), C-Al slitina, boron-epoxy, uhlík(karbon)-epoxy, GRP (s bezalkoholickým sklem s matrixí epoxy, polyester, fenolickou, silikonovou, polyamidy atd. (obr. 30, 31).



Obr. 30 - Srovnání konstrukčních materiálů

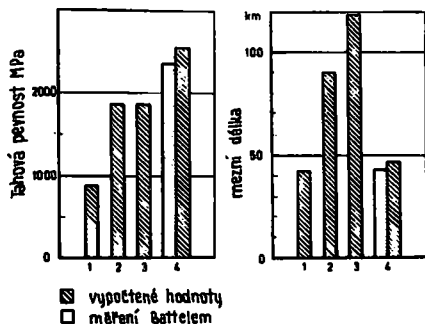


Obr. 31 - Relativní charakteristiky kompozitů s organickou matrix

Kompozity lze vytvářet také ve formě slitiny s usměrněným eutektikem, tzv. cermety, např. z transformovaného austenitu nebo kobaltu a chromkarbidu, nebo Ti-Ti<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, Al-Al<sub>3</sub>Ni, Al-CuAl<sub>2</sub>, WC atd. sinterováním prášků a vnitřní oxidací. Kompozit je též eutektická slitina, například Al-Si-Al<sub>3</sub>Ni apod. (obr. 32).

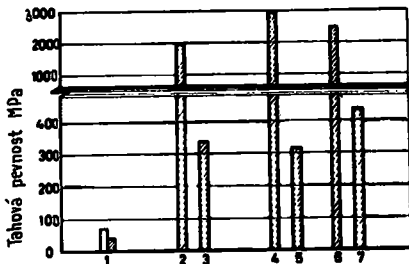
Některé další přínosy kompozitů ukazují další obrázky 33 - 25, příklady úspěšných kompozitů obr. 36 a 37.

Jak se vyvíjí vlastnosti a ceny vláken a kompozitů představuje obr. 38.

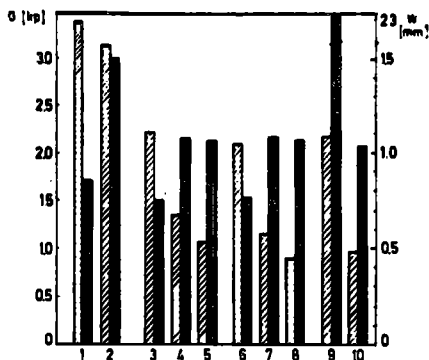


Obr. 32 - Tahová pevnost a specifická pevnost (mezní délka) epoxid. pryskyřice vyztužené 65 obj. % vláken rovnoběžných se směrem zatížení

▨ vypočtené hodnoty  
□ měření Bathelem

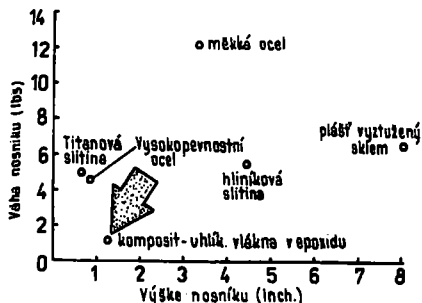


Obr. 33 - Pevnosti kompozitů s matrix ze skla obsahující mikrovlákna  $\phi$  10-15  $\mu$ m  
1 - ohyb. pevnost křemičitého skla  
2 - tahová pevnost mikrovláken (č. 1)  
3 - ohyb. pevnost matrix z křemičitého skla s 18 % obj. mikrovláken (č.1)  
4 - tahová pevnost mikrovláken (č. 2)  
5 - ohyb. pevnost matrix z křemičitého skla s 18 % obj. mikrovláken (č.2)  
6 - tahová pevnost mikrovláken (č. 3)  
7 - ohyb. pevnost matrix z křemičitého skla se 40 % obj. mikrovláken (č.3)



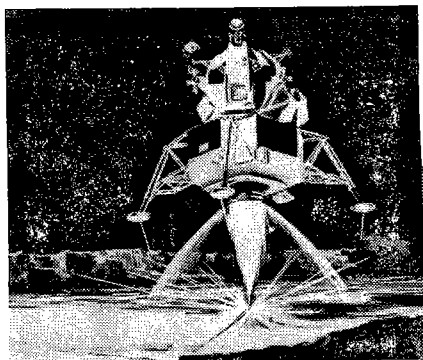
Obr. 34 a - Váha a tloušťka stěny vysokotlakých trub

- 1 - "Maragingová" ocel ( $\sigma_c = 2200$  MPa)
- 2 - Titanová slitina ( $\sigma_c = 1250$  MPa)
- 3 - Al slitina se 60 % obj. vláken z Maragingové oceli ( $\sigma_c = 4000$  MPa) ( $\sigma_c =$  pevnost vláken)
- 4 - Al slitina se 60 % obj. borových vláken z Maraging. oceli
- 5 - Al slitina se 60 % obj. karbon. vláken z Maraging. oceli
- 6 - Mg slitina se 60 % obj. vláken z Maragingové oceli
- 7 - Mg slitina se 60 % obj. borových vláken
- 8 - Mg slitina se 60 % obj. karbon. vláken

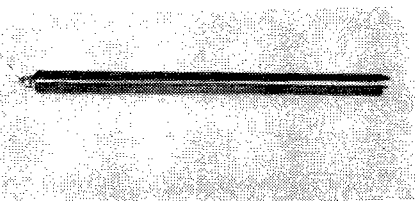


Obr. 34 b - Srovnání šířky a váhy nosníků 12" dlouhých a 1" širokých navržených pro přenesení střed. křeseno 10 000 liber při průhybu 0,10"

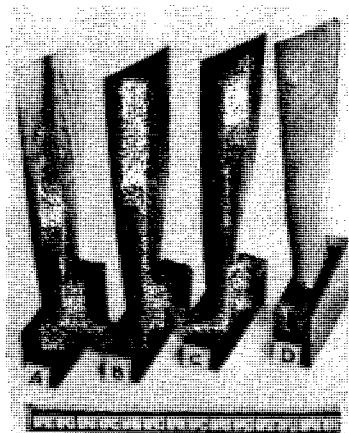
- 9 - Plast se 60 % obj. vláken z E - skla (trvalá pevnost  $\sigma_c = 1300$  MPa)
- 10 - Plast se 60 % obj. vláken ze speciálního skla (předpoklad  $\sigma_c = 3000$  MPa)



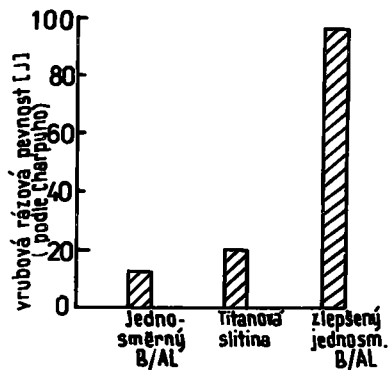
Obr. 35 a - Lunární modul



Obr. 35 b - Vzpěry lunárního modulu z bórepxi-  
dového kompozitu

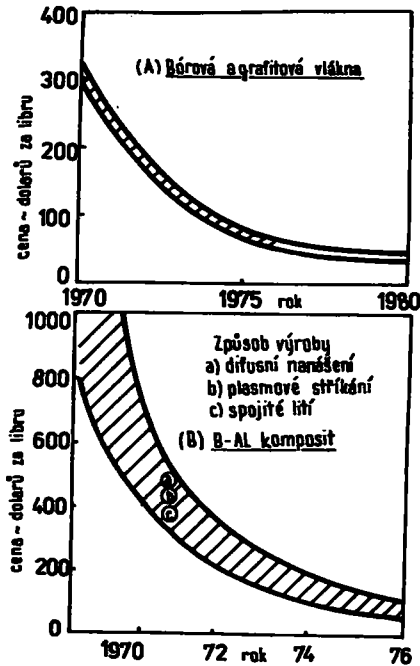


Obr. 36 - Kompresorové lopatky vyrobené  
z kompozitních materiálů  
A: S-sklo-epoxy  
B: boron-epoxy  
C: S-sklo-epoxy jádro +  
+ grafit-epoxy povrch  
D: boron-hliník



Obr. 37 - Vývoj ve zlepšování rázové  
pevnosti





Obr. 38 - Současné a předpokládané ceny vláken a kompozitů