

Práce pro výchovu vedoucích pracovníků chemického průmyslu  
Podolská 16, Praha 4.

**MATERIÁLY**

Ing.Richard Baraš CSc

Ústav teoretické a aplikované mechaniky ČSAV, Praha 2, Vyšehradská 49.

Katedra specialistů, Praha 1971.

### Historie materiálů

Věda o materiálech je poměrně mladá; první laboratoř pro interdisciplinární výzkum materiálů byla založena na University of Chicago (Institute for the Study of Metals) teprve v roce 1946. Od té doby, zejména pod tlakem intenzivního rozvoje raketové a kosmické techniky zaujímá věda o materiálech přední místo ve světovém výzkumu. Nejvyspělejší státy vynakládají v současné době na výzkum v oblasti materiálů více než třetinu celkových výdajů věnovaných výzkumu.

Důležitost materiálů v lidské kultuře byla rozpoznána již starými Řeky, kteří rozdělili historii lidstva na věk zlatý, stříbrný, bronzový a hrdinový, před jejich vlastním, železným věkem. Ve všech těchto etapách vývoje byly považovány materiály za něco samozřejmě daného. Bylo tomu tak především proto, že objevené materiály stačily pokrýt potřeby člověka. Projektant prostě nevymýšlel aplikace, které by vyžadovaly více než snesl kámen, pálená hlína, cement, obvyklé biologické materiály a slitiny starobylých sedmi kovů. Navíc, ačkoli filosofie a věda o hmotě je stejného stáří jako filosofie a věda obecně, věda o materiálech je zcela nová. Nejužitečnější vlastnosti jsou vázány na strukturu

materiálu; tím se ukázalo, že existuje daleko méně rozdílů mezi různými druhy materiálů, než se předpokládalo. Dnes sice už umíme materiál žádaných vlastností navrhovat, dosud se však nepodařilo navrhnout materiál se souborem žádaných vlastností.

Jedním z velkých etap vývoje člověka byl objev, že on sám může změnit podstatu materiálů: hlínu zahřátím na kámen. Téměř dokonalá formovatelnost v jednom stavu a vysoká stabilita a pevnost ve druhém stavu jsou důsledkem komplikovaných změn v atomickém i větším měřítku mezi mikrokristaly hlíny a vodou, chemických změn<sup>+)</sup> a úplné rekrystalisace při zahřátí nad červený žár. Keramika, vlastně první anorganický materiál, který byl strukturálně modifikován člověkem, je příkladem ovlivnění vlastností struktury. Kromě toho, s vyjimkou elektrických a magnetických účinků, byly téměř všechny vlastnosti solidu, které jsou předmětem bádání moderních fyziků pevné fáze, využívány již dřívějšími keramiky: tvarování zahrnovalo plasticitu a thixotropii, závislé na vlhkosti; dekorativní textury byly založeny na zeskelnění a odskelnění, tvorjení různých plynných a krystalických fází, lokálních změnách roztažnosti, viskosity a povrchového napětí; barvy závisí na různých stavech oxydace, na abnormálních iontových stavech, na vmesťcích a na strukturních nedokonalostech v krystalech.<sup>+)</sup>

---

+) Všimněme si při této příležitosti nejstarší glazurovací techniky; je po mnoha stránkách nejjazírnější. Byla to sumerská myšlenka, proslavená po r. 4000 před Kristem jako egyptský modrý fa-jans. Nebyl, jako později, glazován roztavenou směsí skelných materiálů, ale byl vlastně analogií cementačního procesu, během něhož roztavené draslo (potěš) proniká kapilaritou na povrch, kde reaguje se silikátovými částicemi tam přítomnými a vytvoří skelný potah mědnaté zbarveného eutektického silikátu. Tento proces je ještě užíván v Iránu.

Kovy následovaly brzo po širokém využití pálené hlíny. Hlavní přínos a výhoda kovů je v tom, že jsou tuhé při jistém dosti vysokém napětí, ale stávají se zcela plastické nad jistým namá-ním (dosažitelné lokálním působením nástrojů). Dále nad jistou teplotou se stávají plastické a při vyšší teplotě kapalné a mohou být tvarovány odléváním. Nejstarší kovové opracované předměty z mědi (ozdoby) byly objeveny na území Turecka, sev. a severozápadu Iráku z 8 tisíciletí před Kristem a větší věci (nože, kopí) v Sev. Americe ze 3. tisíciletí př.Kr. Mikrostruktura těchto předmětů ukazuje, že kovy byly zpracovány horké nebo opakováně žíhané při červeném žáru. Na Středním Východě okolo 4000 př.Kr. se již pracovalo s mědí tavenou z rudy a brzo potom následovaly slitiny. První slitina vznikla z tavené rudy, která obsahovala jako přírodní nečistoty arsenik a antimon. Tyto slitiny mají vyšší tavný bod, lepší povrch a jsou tvrdší než čistá měď. Okolo 3000 př.Kr. přišla bronz - slitina mědi a cínu, která dominovala po dvě tisíciletí.

Tavení sloužilo nejdříve ke spojení kousků mědi do větších hrud, schopných kování do žádaného tvaru, teprve později k odlévání tvarovaných předmětů přímo. Do doby kdy byla objevena bronz, byly již známé komplikované metody tvarování a spojování drahých kovů - zlata a stříbra. Klenoty z královských hrobů v Ur v Mezopotamii (okolo 2600 př.Kr.) měly vyšší úroveň estetickou ale i technickou, než většina předmětů vyráběných dnes. Ukazují, že jejich výrobci dovedli reprodukovat využívat většinu vlastností, které teprve v současnosti byly vědecky podloženy.

Ke vzniku železného věku vedly ekonomické důvody spíše než kvalitativní. Železo nesloučené s uhlíkem a bez tepelného opracování je měkčí a ve všech směrech horší než za studena zpěvněná bronz. Je těžší ho vyrobit a má také více variabilní vlastnosti.

Výskyt železných rud je však daleko častější a tak prostá úvaha ukázala, že 1000 horších železných mečů je lepší než 10 dobrých mečů bronzových.

Jakmile mohla být vyráběna reprodukovatelně ocel, stala se přirozeně ihned nejlepším kovem. Ocel byla snadno objevena, ale poznání, že to je slitina, trvalo dlouho (1774). Slévání uhlíku se železem se nedálo viditelně, když uhlík byl absorbován při vytváření kovu z dřevěného paliva. Metalurgové se tehdy domnívali, že ocel je čistá forma železa, neboť má lepší vlastnosti a vzniká až po prodlouženém ohřevu v ohni, který zbavil většinu věcí nežádoucích příměsí. Železo zůstalo po tisíciletí kovářským kovem: póravité železo resultující z redukce čisté rudy s dřevěným uhlím v praxi bylo netavitelné, ale kujné a lehce zpracovatelné kováním za bílého žáru (svářkové železo). Spojením s uhlíkem přechází v litinu, která se kromě Číny začala používat až po r. 1400.

Tepelné zpracování je, po slévání a studeném zpevnění deformací, třetí základní cesta modifikace vlastností kovů. Dochází při něm k rekrytalisaci, u oceli velmi drastické. Nejstarší důkazy dokonalého zvládnutí tepelného zpracování byly objeveny v Luristanu: krásné kované meče z 9. a 8. stol. před Kr. Jejich mikrostruktura ukazuje na zpracování kovu s poměrně vysokým obsahem uhlíku za horka při teplotách nepatrн nad a pod přechodovou teplotou a kalení. Zbraně Řeků a Římanů byly sice někdy tvrzeny kalením, obvykle však s důsledkem nadměrné křehkosti. Proto několik čepelí mečů z antiky, perfektně tepelně zpracovaných, se stalo legendárními.

Avšak prvotní empiričtí objevitelé materiálů na Blízkém Východě dělali svou práci dobře. Nalezli téměř všechny slitinové kompozice, které mohly být udělány redukcí dřevěného uhlí z poznaných přírodních minerálů. Nástroje, střelné zbraně, součástky, stavby,

Istroje pro rozvoj moderních věd, stroje a konstrukce inženýrů 19. stol., to všechno bylo uděláno z materiálů, které byly užívány staletí před vznikem Řecka. Metalurgové celé toto období zabývali převážně rozvojem výroby a její spolehlivosti, než tili ale potřebu nových kompozic.

Teprve rychlý vývoj těsně před začátkem 20. století žádal nová stanoviska, nové znalosti a měl nové potřeby.

První zaznamenané spekulace o povaze metod hmoty jsou od řeckých filosofů.

Atomismus Democrita - vznikl z pozorování textury kamenů, keramiky a zřejmě relace mezi vlastnostmi různě opracovaných kovů a jejich textury na lomu  
18 protichůdných vlastností Aristotela, jeho materiály tavné a netavné, viskozní nebo drolivé, hořlavé nebo nehořlavé atd., popisující všechny substance.

Alchymisté hledali relace mezi vlastnostmi hmoty a principy vesmíru s cílem transmutace a změny souhrnu vlastností materiálů. Za podklad jim sloužily železo, ocel, litina, hliná, keramika, popel, písek, drahokam, měď, "zlatá" mosaz. +)

Principy Paracelousovy (16. stol.) vytlačily základní vlastnosti Aristotela. Sůl, síra, rtuť byly intuitivně nalezené modely iontové, molekulární a kovové vazby materiálů se zřetelně rozdílnými vlastnostmi. Toto pojetí však bylo brzo zatlačeno chemií, založenou výhradně na analytickém určeném složení.

Rovněž teorie flogistonu (podstaty všeho zápalného) a tepla byla v 18. století zatlačena precismější chemií. ++)

Dnes ovšem víme, že nelze napodobit současně všechny vlastnosti např. zlata bez atomických jader, majících pozitivní náboj 79.

Jiná cesta k zabezpečení žádaných vlastností je ještě ve volbě chemických charakteristik, a mnoho může být uděláno změnou struktury látky. Moderní alchymie je tak spíše fyzikou pevné fáze.

přístroje pro rozvoj moderních věd, stroje a konstrukce inženýrů 19 stol., to všechno bylo uděláno z materiálů, které byly známy staletí před vznikem Řecka. Metalurgové celé toto období se zabývali převážně rozvojem výroby a její spolehlivosti, ne - cítili ale potřebu nových komposic.

Teprve rychlý vývoj těsně před začátkem 20. století žádal nová stanoviska, nové znalosti a měl nové potřeby.

První zaznamenané spekulace o povaze metod hmoty jsou od řeckých filosofů.

- Atomismus Democrita - vznikl z pozorování textury kamenů, keramiky a zřejmě relace mezi vlastnostmi různě opracovaných kovů a jejich textury na lomu
- 18 protichůdných vlastností Aristotela, jeho materiály tavné a netavné, viskosní nebo drolivé, hořlavé nebo nehořlavé atd., popisující všechny substance
- Alchymisté hledali relace mezi vlastnostmi hmoty a principy vesmíru s cílem transmutace a změny souhrnu vlastností materiálů. Za podklad jim sloužily železo, ocel, litina, hliník, keramika, popel, písek, drahokam, měď, "zlatá" mosaz. +)
- Principy Paracelousovy (16. stol.) vytlačily základní vlastnosti Aristotela. Sůl, síra, rtuť byly intuitivně nalezené modely iontové, molekulární a kovové vazby materiálů se zřetelně rozdílnými vlastnostmi. Toto pojetí však bylo brzo zatlačeno chemií, založenou výhradně na analytický určeném složení.
- Rovněž teorie flogistonu (podstaty všeho zápalného) a tepla byla v 18. století zatlačena precismější chemií. ++)

+ ) Dnes ovšem víme, že nelze napodobit současně všechny vlastnosti např. zlata bez atomických jader, majících positivní náboj 79.

Jiná cesta k zabezpečení žádaných vlastností je ještě ve volbě chemických charakteristik, a mnoho může být uděláno změnou struktury látky. Moderní alchymie je tak spíše fyzikou pevné fáze.

Velký pokrok fyziky v 17. století se týkal hlavně hmoty a jiných aspektů materiálu, které však nesouvisely se strukturou. Atomičtí filosofové podávali výklad plasticity, tažnosti a pevnosti založený na ad hoc předpokladech o způsobu složení a uspořádání častic. Tyto předpoklady byly důmyslné a často správné, avšak takové atomové filosofické spekulace zmizely pod vlivem Newtonových matematických metod a fyzikové se ne mohli vážně vrátit k otázkám pevné fáze až do naší doby.

Strukturální stránka vědy o materiálech, přes jejíž časný začátek v lomových zkouškách a atomové filosofii se rozvíjela pomalu. V r. 1772 publikoval René Ferchault de Réaumour vyjímečnou práci o železe, založenou na zjištěných i hypotetovaných změnách struktury na úrovni, kterou dnes spojujeme s mikrostrukturou. Rozvoj tohoto druhu strukturální spekulace byl však zastaven newtonskou necitlivostí a mikrokrystalická zrna se vrátila do vědy znova až na konci 19. století, následované objevy mikrostruktury oceli.

Mineralogie zatím studovala uspořádání vnějších tvarů krystalů a matematický popis krystalické soustavy byl odvozen bez ohledu na povahu vyšetřovaných jednotek. Byly zapomenuty KeplEROVY a Hookovy práce popisující růst krystalických mnohostěnů ze skladby koulí. Základem většiny fyzikálních a chemických diskusí o solidu 19. stol. se stala molekulární komposice spíše měř krysta-

---

++) Flogistonisté, jak se ukazuje ve světle dnešní kvantové fyziky pevné fáze, měli do určité míry pravdu: elektron, věc tak malá a nehmotná jako flogiston sám, při přechodu z kyslíkového iontu do kovu propůjčí kovu všechny vlastnosti, které dělají kovy zajímavé nebo užitečné.

linická struktura. Dominance molekuly byla nahražena dnešním strukturně-atomistickým pohledem teprve jako výsledek nové experimentalní techniky, především X-paprskové difracce (1912). Tím se stala struktura v atomickém měřítku stejně reálnou, jako makrostruktura, viditelná mikroskopem. Pak byla postřehnuta role vad ve stavbě krystalů a vystoupila do popředí povaha styčné plochy mezi krystalovými zrny, krátce hranice zrna.

V této fázi se začaly objevovat i nekovy ve vědeckých studiích materiálů. Keramika např. spojila všechna zajímavá krystalová uspořádání kovů s elektrickými výhodami polovodičů. V 19. stol. se rychle vyvinula chemie a poznatek, že mnoho směsí zcela stejného složení má různé vlastnosti, vedl organické chemiky k vynálezavému pojetí struktury: molekulární architektura se brzo stala centrální částí organické chemie a řídící okolnosti ve vývoji komplikovaných struktur.

Primerní <sup>12</sup> pochopení materiálů je představa, že jejich vlastnosti závisí od struktury, od způsobu, ve kterém se skladebné atomy agregují do hierarchie molekulárního nebo krystalického řádu nebo do neuspořádých amorfálních struktur.

Největší skupina materiálů, zahrnující kovy a většinu minerálů má krystalickou strukturu, t. j. atomy jsou uspořádány pravidelným způsobem. V mnoha kovech (např. med a nikl) jsou spořádány přesně tak, jako by se naskládaly tenisové míčky do krabice s úmyslem uměstnat jich do ní co nejvíce. Jiné kovy (např. Mítina) mají tzv. centrálně (prostorově) kubickou strukturu; atomy jsou v rozích krychle a v tělesném středu (v těžišti). Uspořádání atomů ve všech krystalických pevných látkách je dáno některou ze 14 kategorií (viz obr. 1).

Nejobvyklejší z amorfní skupiny pevných látek je sklo. Jeho atomy jsou složeny méně uspořádaným způsobem než u kovů. Strukturu amorfálních látek je mnohem obtížnější objasnit a v současné

době je vyvíjeno velké úsolí o pochopení atomového uspořádání takových materiálů. Navíc, kromě struktury uspořádání atomů, vlastnosti makroskopických objemů hmot všech druhů závisí silně na struktuře ať čistě architektonických nebo chemických. Ukázalo se, že většina hledaných a využívaných vlastností materiálů závisí spíše na vlastnostech agregátů, než na vlastnostech skladebných atomů a jednoduchých molekul, jak předpokládali vědci 19. stol. Nejdůležitější je uspořádání vnějších elektronů, které je silně ovlivněno konfigurací sousedních. 93 druhů stabilních atomů, nebo i 10 nejobvyklejších v zemské kůře umožňuje téměř nespočitatelné strukturní kombinace. Všechny materiály závisí na pěti typech vazeb ve fyzice pevné fáze. A každý typ vazby je v podstatě zvláštní strukturní rámec pro interakci elektronů (viz obr.2).

Ze všech přístupů k přírodě se zdá být věda založená na struktuře nejvíce schopná sjednotit mikroskopický a makroskopický pohled, teorii a praxi, intuici a logiku, krásu a prospěšnost. Materiál byl ovšem nezbytný ve vědecké laboratoři, ateliéru nebo dílně. Dosud většinou vznik potřeb ať vědeckých nebo průmyslových předcházel vzniku příslušného materiálu. Dokud např. nevznikl elektronický průmysl, byla pociťována jen malá potřeba zdokonalení v magnetismu kovů. Avšak mnoho vlastností - nyní enormě důležitých - bylo objeveno pouze vědeckým výzkumem. Např. velký popud ke studiu elektrických vlastností materiálu přišel v roce 1857, kdy bylo zjištěno, že jistá španělská měď použitá v transatlantickém telegrafním kabelu měla vodivost pouze 14% nejlepší dostupné mědi. Později objev elektronů nedvedl pouze k teoriím vodivosti, ale také - nahliženo z hlediska kvantové mechaniky - se stal důležitou příčinou aggregace hmoty.

o základem všech jeho vlastností. Přitom schematická představa vnějšího elektronového obalu kolem "jádra" je nahrazena realističtějším pojetím elektronového plynu (mlhy) kolem skutečného jádra (nukleonu). Pokud jde o vodivost, ukázalo se, že nejlepší vodič je ten, ve kterém jsou atomy stejného druhu a uspořádány v perfektním krystalickém řádu (obr.3).

Každé užití materiálů, ať jakkoli triviální, zahrnuje výběr. Je možné pomocí znalostí nebo experimentu maximizovat jakoukoli jednu vlastnost, ale při žádné aplikaci nelze vybrat materiál pouze pro tuto jednu vlastnost. Materiálový inženýr musí však zvážit jeden faktor proti druhému, musí navrhnut materiál s určitým kompromisem vlastností a věda musí říci, jak dosáhnout struktury, která dá žádáný výsledek.

Dlouhé období byly hlavním kriteriem pro výběr materiálů mechanické vlastnosti. V současné době se změnil počet materiálů, které v konkurenci s ocelí mohou ekonomicky zabezpečit soubor mechanických požadavků výroby i užití. Konstantní tlak nových požadavků vyvolaly elektronický a komunikační průmysl, jejichž inženýři byli schopni vidět všechny materiály v novém koncepcním rámci materiálové vědy. Je možné, že centrální směr materiálového vývoje je zlepšení mechanických vlastností. Bylo by ale špatné nevidět, že byly zlepšeny i jiné vlastnosti, jakmile se vyskytla potřeba. V dnešní době každá vlastnost již může být dosažena ve více než jedné třídě materiálů.

Např. bezvadné elektrické vodiče byly nalezeny již v době frikční elektřiny u obyčejných kovů, ale nalezení materiálu odolného oxydaci (potřebného pro vysokoteplotní elektroniku) byla zapotřebí ještě dlouhá doba vývoje. Slitina nikl-chrom tak obdržená přispěla k vývoji materiálů s výbornou pevností

za vysokých teplot.

Vývoj ohebných wolframových vláken potřebných pro bílé světlo vedl ke studiu chování hranic zrn, jež mělo daleko větší význam než jakýkoli vědecky inspirovaný výzkum předtím.

U slitin se nevyhnutelně zvyšuje elektrický odpor při normálních teplotách; objev supervodivosti změnil všechny tyto představy a umožnil vznik celé řady nových slitin.

Skvělá kombinace vědy a technologie přinesla objev široké škály materiálů pro elektronické zařízení: nejdříve empirické nalezení fotovodivosti selenia, elektrická lampa využívající vlastnosti uhlíku, krystalové a whiskerové radiopřijímače a později radar vedly k nalezení nejlepšího z polovodičů-křemíku. Pak následovalo nalezení transistorů, což dalo vzniknout modernějším fyzikálním teoriím i praktickým procesům výroby materiálů fantastické čistoty a kontrolované nečistoty.

Jen nepatrně méně kouzelná je povídka o vývoji nových magnetických materiálů "tvrdých" i "měkkých".

Současně s novými poznatkami fyzikální povahy jde i nový vývoj inženýrského rozhodování a volby materiálů: přestávají se hodnotit vlastnosti přímo, absolutně a namísto předimensování k trvalému zajištění proti porušení se navrhují na očekávanou životnost (ekonomickou, společenskou, morální) celku.

Různé funkce různých částí zařízení nebo konstrukce, dosud zajišťované výrobou z prvků z různých materiálů (tvrdý čep v bronzovém pouzdře v dřevěném stroji, natřeném na povrchu k zabránění korosi a snížení hořlavosti; tažený a tepelně zpracovaný ocelový drát kotvení prostřednictvím botek z lité oceli u zavěšených mostů; odpor přivařený k vodiči; dřevěné držadlo na stříbrném čajníku atd.); ideálem je provést celé zařízení z jednoho materiálu s plynule se měnícími vlastnostmi v

jednotlivých dílech podle potřeby. Že to nelze? Ale ano. Již ve starověku nacházíme příklady tohoto postupu: glazovaná keramika, modrý fajans, ocelové předměty s proměnným obsahem uhlíku a proměnnou tvrdostí v různých částech, materiály s plánovanou heterogenitou (damašková ocel). Ostatně všechny materiály mají nějaké mikroskopické nebo submikroskopické heterogenity, které jim jsou více méně přirozené. Vzrušující nové pole je produkce kompositních materiálů se syntetickou heterogenitou. Inženýr bude navrhovat místní mikrostrukturu materiálu se stejnou samozřejmostí a ve stejné době, jako navrhuje stroj nebo konstrukci. Celkem bude bez ostrých rozhraní mezi korosivzdorným povrchem a pevným, napětí přenášejícím vnitřkem průřezu, se změnou modulu pružnosti mezi konci nosníku a středem.

V elektronice již všude nahrazují systémy navržené a složené ze separátních jednotek polovodičové okruhy.

Návyky myšlení vyvolané tímto vývojem mohou se ukázat mnohem důležitější než nápady samy. Omezení naší minulé vědecké teorie je pojmová separace funkcí. Není ovšem žádný důvod, proč by tomu tak mělo být vždy. V biologických materiálech je možné nalézt složky s konstrukční funkcí a složky s elektrickou nebo chemickou funkcí. V takovém přístupu i v technických materiálech leží zřejmě pokroková fronta materiálové vědy v budoucnu.

Jedním z přínosů moderních věd je, že veškeré poznatky jsou aplikovatelné v různém měřítku. Existuje spojitá hierarchie struktur a interakcí: elementy, jádra, atomy, molekuly, krystaly, buňky, horniny, továrny a živočichové, společnosti, hory, kontinenty, planety, hvězdy, vesmír. Pro studium je dělíme do jednoduchých časově nezávislých nebo lineárních kategorií, avšak platnost všech leží ve skutečnosti, že existuje souhra mezi měřítky, i v čase.

V minulosti většina všeho bádání a pokroku ležela v analyse k nalezení přesně specifikovatelných jednotek; syntéza byla opomíjena. Nyní je hlavním úkolem fundovaná syntéza jednotek do základní hierarchie struktury.

Studium tzv. klasických materiálů, jako kovů, keramiky, skla ponechám iniciativě posluchače. Zde si podrobněji všimneme jen dvou nových skupin-plastických hmot a kompositních materiálů.

#### Povaha polymerních materiálů - plastických hmot.

Život zcela závisí na organických polymerech. Poskytuje nejen potravu, ale také odívání, úkryt a dopravu. Skutečně téměř všechny materiální potřeby člověka mohou být zajištěny /a v mnohých dobách a na mnoha místech skutečně byly/ přírodními organickými produkty. Seznam materiálů a věcí z nich by byl velmi dlouhý: dřevo, kožešina, vlna, kůže, len, bavlna, hedvábí, pryž, oleje, ropa, plachtovina, papír, pergamen, plátno, barva, strunové hudební nástroje, luky, šípy, stany, domy, lodě, boty, pečetní vosk.

Přírodní organické polymery, ze kterých jsou vyrobeny tyto věci, obsahují proteiny, celulózu, škrob, pryskyřice, lignin a několik dalších složek. Pro složitost a chemickou křehkost jejich molekul vzdorovaly přírodní organické polymery, ačkoliv známé a užívané po staletí, pokusům analyzovat jejich molekulární strukturu až téměř dodnes. Teprve po roce 1920 moderní fyzikální příp. chemické metody a mohutné přístroje jako ultracentrifugy, elektronkové mikroskopy, viskosimetry, osmometry, přístroje X-paprskové difracce atd. umožnily porozumět principům, které řídí vlastnosti přírodních polymerů a organičtí chemikové, absolvující školu přírody, utvořili postupně nový průmysl syntetických, člověkem

vyráběných organických polymerů. Tento průmysl se stal domi-nujícím ve všech průmyslových zemích. V USA např. bylo vyro-beno již v r. 1966 přes 6 miliard kg syntetických plastů a prys-kyřic, v celkové hodnotě více než šest miliárd dolarů.

Základní výrobky jsou vlákna, obalový materiál, syntetická pryž, nátěry, lepidla a " mléčná dráha " materiálů nazývaných souhrnně " plastické hmoty " / plastics /. Trhy pro tyto výrob-ky začínají být ve vyspělých státech naplněny a průmysl se pro-to dívá po nových odbytištích. Největší šance pro rozšíření syn-tetických polymerů ve velkém měřítku leží na poli konstrukčních materiálů- ne pouze pro domy a jiné budovy, ale také pro auto-mobily, letadla a lodě. Plastické hmoty jsou již obvyklé v de-koncovacích pracích stavebních konstrukcí, jako podlahové krytiny, izolace, povrchové úpravy atd. Chemici nyní intensivně studují možnosti úpravy organických polymerů pro konstrukční účely: nosné vertikální i horizontální prvky, konstrukční skořepiny a nádrže různého použití.

Syntetické polymery nyní dostupné již poskytuji některé z vlastností žádaných pro konstrukční materiál. Jsou lehké, lehce transportovatelné, lehce instalovatelné, lehce opravovatelné, vy-soce odolné korosi a rozpustidlům a bezpečně odolávající vlhkosti. Nesplňují požadavky na konstrukční pevnost, dlouhodobou životnost a odpor vysokým teplotám. Výhled pro vývoj polymerů, které budou mít tyto vlastnosti je však dobrý. Hlavní otázka má co dělat s jejich cenou: zbývá se podívat jestli syntetické polymery mohou být udělkány dosti levné, aby mohly soutěžit s tradičními kon-strukčními materiály - kovy a keramikou.

Moderní metody výzkumu ukázaly, že molekuly polymerů jsou až neuvěřitelně velké: molekulová váha se pohybuje až k milionům jednotek, zatímco jednoduché organické substancie takové jako cukr

a benzin mají molekulovou váhu v rozsahu asi 50 - 500. Ukázalo se dále, že gigantické molekuly jsou složeny z velkého počtu opakujících se jednotek; proto jim bylo děno jméno " polymer" od řeckého slova poly/mnoho/ a meros /části/, a stavební bloky byly nazvány monomery. Bylo nalezeno, že většinu polymerů tvoří dlouhé ohebné řetězce. Jsou-li molekuly uspořádány těsně vedle sebe do svazků, vytvoří pravidelnou krystalinickou strukturu. Výzkum přírodních polymerních materiálů ukázal, že jejich struktura byla složená - šástečně krystalinická a částečně amorf - ní. Jestliže krystalinická struktura převažovala, materiál byl relativně pevný, tuhý a odporující teplu a rozpouštění; jestliže struktura byla amorfni, substance byla měkká, elastická, absorbující a propouštějící tekutiny.

Když se chemici naučili tyto základní pravidla, přistoupili k syntetizování umělých polymerů. Brzy měli úspěch ve vytváření nových monomerů z jednoduchých a laciných základních materiálů, v účinném spojování monomerů do dlouhých řetězců, v obdržení kvantitativních dat o molekulové váze a struktuře polymerů a ve zjištění jak strukturní detaily ovlivňují vlastnosti polymerů. Toto úsilí začínající r. 1920 vedlo v r. 1940 k založení průmyslu, produkovajícího syntetická vlákna a řadu dalších polymerních materiálů, z nichž mnohé byly lacinější a lepší v různých směrech než přírodní materiály, podle kterých byly modelovány .

Vlastnosti, které musí organické polymery získat, aby se kvalifikovaly jako konstrukční materiály/ pro stavby a vozidla/ mohou být specifikovány takto :

1. modul pružnosti  $50\ 000\ kg/cm^2$
2. tahová pevnost nejméně  $7\ 000\ kg/cm^2$

3. pružnost nejméně 10 %
4. bod tání nebo měknutí nad  $500^{\circ}\text{C}$
5. vysoká odolnost proti působení tepla, radiace a korosivních chemikalií.
6. vysoká odolnost proti působení rozpustidel a botnání způsobujících činidel, i při zvýšených teplotách.

Zkoumejme nyní charakteristiky polymerních struktur a uvažujeme, jak mohou být využity ke zlepšení vlastností materiálu.

Jedna charakteristika je schopnost řetězců organizovat se do krystalinických struktur. Když polymer s pravidelným uspořádáním atomů nebo atomických skupin řetězců je podroben mechanickému namáhání, řetězce se orientují, mají silnou tendenci k rovnoběžnému uspořádání a tvoří krystality. Individuální vazby spojující řetězce nejsou silné, ale jejich velký počet a pravidelná vzdálenost dávají značnou tuhost struktuře, tím se materiál stává tvrdý, nerozpustný a vzdorující měknutí teplem. Takto i krystalinový polyetylen, jehož řetězce vážou dohromady van der Waalsovy síly, je materiál pevný, tuhý, odolný obrusu a se značně vysokým tavným bodem / $130^{\circ}\text{C}$ / . Podobně polypropylen, jiný polymer s pravidelným uspořádáním řetězce, je tuhý a má tavný bod  $175^{\circ}$  v krystalinické formě, polystyren je ještě odolnější rozpouštění, a s tavným bodem okolo  $230^{\circ}\text{C}$ . Ještě silnější a více teplu odolné materiály mohou být obdrženy krystalizací polymerů, které obsahují polární skupiny /skupiny ve kterých jsou separovány pozitivní a negativní elektrické náboje / vykazující silnější meziřetězcové vazby. Příklady takových materiálů jsou nylon, Saran, Dacron a Mylar ( obr. 4 ).

Krystalizace není jediný princip vedoucí ke zvýšení pevných a odolných polymerů; druhý princip je chemické příčné spojení řetězců.

K vytvoření silných chemických vazeb mezi řetězci přispívá např. síra. Tento proces je zcela rozdílný od krystalizace: zatímco krystalizace je fyzikální jev, který závisí na orientaci řetězců, není ovlivněn teplotou a může být vratný bez dekompozice polymeru, příčné sesítění je účinek, který závisí na chemické reakci, je silně urychlován zvyšováním teploty a není vratný; u materiálu nedochází při růstu teploty k měknutí, a materiál se úplně poruší při dosažení teploty rozkladu.

Dobrý příklad příčné zesítovaného polymeru je pryž. V její nejobyčejnější formě /vulkanizovaná pryž pneumatik/ jsou řetězce ~~zesítěny~~ jistým množstvím atomů síry, které ubírají pryži pružnost. Zvětšení počtu příčných vazeb způsobuje zvýšení tuhosti materiálu až k ebonitu, - materiálu velmi tuhému, s extrémně vysokou teplotou měknutí a zcela nerozpustného a nepropustného. Ebonit, jedna z nejstarších plastických hmot, je prototyp mnoha jiných příčně sítovaných termosetických polymerů, jako jsou produkty založené na formaldehydu, furanové pryskyřice, polyestery, epoxidu, a pod.

Kdyby krystalizace a příčné sesítění byly jediné vhodné způsoby zpevnění a ztužení organických polymerů, byla by malá naděje na syntézu polymerů, které by plně vyhovovaly jako konstrukční materiál. Maximum, které by mohlo být dosaženo kombinací krystalizace a příčného sesítění je modul pružnosti okolo  $35\ 000\ kg/cm^2$  a teplota tavení okolo  $350^\circ C$ , příliš málo vzhledem k požadavkům žádaným pro stavební materiál. Existuje však třetí, nyní intenzivně vyšetřovaný a velmi slibný princip.

Materiály, o kterých byla dosud zmínka, jsou všechny složeny z přirozeně ohebných řetězců. Segmenty, z nichž jsou tyto řetězce sestaveny, jsou spojeny otočitelnými spoji, a mohou se lehce ohýbat, kroutit nebo skládat jeden ke druhému. Proto jedi-

ná cesta, jak zajistit tuhost a pevnost, je spojovat řetězce dohromady tuhými spoji buď prostřednictvím krystalizace nebo příčného zesítění. Je zřejmé, že tuhost může být přitom podstatně zvětšena použitím řetězců, které samy jsou vnitřně tuhé.

Existuje několik možných cest, jak ztužit polymerní řetězce. Jeden je zavěsit objemnou skupinu atomů na řetězce k omezení ohýbu. Příkladem tohoto principu je polystyren. K uhlíkovému skeletu řetězce v polystyrenových molekulách jsou připojeny benzenové kruhy, což způsobí takové ztužení, že polystyren se stane tvrdou plastickou hmotou, s daleko vyšším bodem měknutí /90°C/, i když jeho řetězce nejsou příčně zesítěny nebo uspořádány v krystalických řadách. Nepřítomnost krystalinity dělá materiál zcela transparentní a nepřítomnost příčného zesítění umožňuje jeho snadnou tvarovatelnost. Jiný příklad je polymetyl-metakrylát, který vlivem skupin metylu / CH<sub>3</sub>/ a metakrylátu /COOCH<sub>3</sub>/ připojených k uhlíkovým atomům podél řetězce dá tvrdý, bezvadně transparentní materiál, s bodem měknutí 95°.

Materiály ztužené přidáním objemných skupin k řetězci mají však nedostatky: jsou daleko lehčejí rozpustné a jsou náchylné k botnání. Zdá se, že objemné skupiny dovolují ochotně penetraci systému rozpustidel a botnání způsobujícími činidly. Proto se výzkumná pozornost zaměřuje na způsoby ztužení skeletu řetězce samého.

Klasickým příkladem polymeru s tuhým skeletem je celulóza, strukturní kostra dřeva. Molekula jejího řetězce je řada kondenzovaných molekul glukos/cukru/ majících tvar kruhu. Na základě tohoto řetězce chemici již dávno získali acetát celulosy a nitrát celulosy, jež jsou tvrdé a transparentní amorfni termo-

plastické průskyřice, s vysokou teplotou tavení. V těchto směsích skupiny acetátu /OCOCH<sub>3</sub>/ a nitrátu /ONO<sub>2</sub>/ jsou připojeny nepravidelně podél řetězce a vysvětlují nepřítomnost krystalinity. Připojené skupiny dávají ole směsi již zmíněné nedostatky: acetát celulosy a v menší míře i nitrát celulosy jsou dosti citlivé na působení rozpouštědel a botnadel.

Chemici nyní experimentují s jinými monomery, které jako cukóza sestávají z kruhových skupin atomů majících v důsledku toho vnitřní tuhost. S těmito monomery vytvořili řadu tvrdých polymerů dobrých vlastností: některé z nich mohou být vystaveny teplotám až 500°C po dlouhou dobu bez měknutí nebo rozkladu a jsou úplně netečné ve všech rozpustidlech při teplotách až 300°.

Jeden ze slibných přístupů je založen na použití polyfenolového řetězce. Monomér, fenol, vzniká z benzénu a má kruhovou strukturu. Fenolové kruhy jsou spojeny v řetězce jednoduchými vazbami mezi atomy uhlíku; tyto vazby zabraňují zkroucení a ohýbu řetězce i při poměrně vysokých teplotách. Polyfenoly jsou tuhé a s vysokým bodem tání, mají zřetelnou tendenci krystalizovat a jsou vysoce nerozpustné. Dosud však vlastní tuhost řetězce fenolu nemohla být plně využita, protože nebyl ještě nalezen způsob vytvoření jeho polymeru v dostatečně dlouhých řetězcích.

Druhou zajímavou skupinou polymerů, založenou na aromatických řetězcích /sestávajících z kruhů benzenevého typu/ jsou "žebříkové polymery". K získání těchto polymerů prochází výchozí hmota /obyčejně polyakrylonitril nebo 1,2 - polybutadien/, serif následných ohřevů. Struktura těchto polymerů odpovídá "řetězci" grafitu, v němž každém kruhu je jeden atom uhlíku nahrazen dusíkem. Materiály jsou tvrdé a zcela nerozpustné a netavitelné-

Takových možností pro vytvoření dlouhých tuhých řetězců existuje ovšem mnoho. Další otázkou je, mohou-li se obdržet ještě lepší výsledky kombinací dvou nebo tří principů zpevňení /krystalizace, příčné zesítění a tuhé řetězce/.

Sumarizuje, co již bylo dokázáno každým z jednotlivých přístupů a kombinací dvou principů. Krystalizační metoda produkovala velký počet termoplastických materiálů, zvláště vláken a nátěrů, jako polyethylén, polypropylén, polyoxymetylen, polyvinylelkohol, polyvinylchlorid, polyvinylidenchlorid a polyamidy takové jako 6-nylon a 66-nylon. Příčné se dívá tvrdé pryže, termosetické pryskyřice, polyestery, síťované polyepoxidy, polyuretany a pryskyřice a plasty tvořené složením formaldehydu s močovinou, melaminem nebo fenolem. Ve skupině polymerů založených na tuhých řetězcích jsou polystyrény, polystyrenové deriváty, řetězcové polyepoxidy, polymetylmetacrylát, polykarbonáty, polyestery, polyethery a další produkty.

Kombinace krystalinitu a příčného zesítění daly krystalizaci schopné pryže: přírodní pryž, 1,4 - cis - polybutadien, polyisopren a neopren. Jestliže je zavedeno velké množství příčných vazeb, ztrácí polymer svou krystalinitu a stává se amorfní /případ ebonitu/. Aby se zvětšila tuhost pryže a jiných elastomerů, které nejsou ochotny krystalizovat, je obyčejně přidáváno pevné plnivo. Částice plniva/tvrdý, jemně dělený materiál, jako saze, silikáty nebo aluminium/ připojí se silně k polymerovým řetězcům adsorbcí a slouží ke ztužení řetězců znehybňením segmentů; ve skutečnosti znamenají jistý druh krystalinitity systému.

Bylo již poznamenáno, že touto kombinací se dosáhne nejvýše modulu pružnosti  $35\ 000\ kg/cm^2$  a teplota tavení okolo  $350^\circ C$ .

Kombinace krystalinity s užitím vnitřních tuhých řetězců dává opět podobný účinek. Dobrou ilustrací je celuloza. Její tuhé řetězce dávají materiál vysoké tahové pevnosti a vysokého bodu tání i při relativně nízkém stupni krystalinity. Se zvýšením tuhosti řetězce a krystalinity dávají směsi založené na celulozovém skeletu vzniknout polymerům, které jsou extremně tuhé, netaví se vůbec a jsou rozpustné pouze ve velmi malém počtu zvláště silných rozpustidel. Jeden příklad účinného spojení tuhosti řetězce a krystalinity je triacetát celulózy: schopnost polymeru krystalizovat vybavuje ho některými výhodami proti obyčejnému acetátu celulózy, pozoruhodně větším odporem organickým rozpouštědlům a zlepšením termosetické charakteristiky. Terylén je jiná ilustrace účinnosti kombinace dvou principů. V tomto krystalinickém polymeru /chemicky popsaném jako polyethylenglycolterephthalát/ jsou řetězce pouze mírně tuhé a jsou pro nedostatek vodíkových vazeb navzájem drženy extrémně slabými příčnými silami. Přesto kombinace krystalinity a tuhosti řetězce dostačuje, aby byla získána vlákna vysoké pevnosti a vysokého bodu tání/ 260°C/ .

Třetí možné spojení principů - kombinace tuhosti řetězce a příčného spojení - bylo také prozkoumáno; vedlo rovněž k povzbudivým výsledkům: např. zvětšením počtu příčných vazeb mezi řetězci u epoxidového polymeru se ztuženým řetězcem se dosáhlo větší tuhosti a odporu rozpouštění.

Jelikož kombinace dvou ze tří zpevňujících principů účinně zlepšuje vlastnosti polymeru, chemici přirozeně věří, že dostanou ještě lepší výsledky kombinací všech tří principů / Viz obr. 5 / . Jeden ze zajímavých výsledků výzkumu v tomto směru je aplikace tří principů ke zlepšení vlastností bavlny a umělého

hedvábí. Vlákno je podrobeno dvojímu zpracování: mechanickému ke krystalizaci tuhých celulozových řetězců a zpracování s chemickými přísadami, které způsobuje příčné vazby. Bylo na lezeno, že příčné zesíťování podstatně sníží mačkavost výrobků udělaných z takových vláken, bez zhoršení jejich ostatních vlastností. Podobně byly obdrženy slibné výsledky ve zpevnění polymerů epoxydového a uretanového typu. Do těchto systémů s tuhými příčně propojenými řetězci přidali experimentátoři plniva k dosažení ekvivalentu krystalizace.

Jsou všechny důvody předpokládat, že úplné a systematické prozkoumání zpěvnění všemi třemi principy povede k mnoha novým a zajímavým organickým polymerům, využitelným pro stavbu našich obydlí, průmyslových staveb a dopravních prostředků.

#### Povaha kompositních materiálů.

---

Až do nedávné doby byly komposity považovány jednoduše za kombinaci dvou materiálů; ve skutečnosti kombinace má své vlastní odlišné vlastnosti, v některých aspektech (pevnosti, tepelném odporu nebo pod) jsou buď lepší než složky samy nebo alespoň radikálně rozdílné od některé z nich. Tato koncepce kompositů vede k návrhu a výrobě nové třídy konstrukčních (makrostrukturálních) materiálů, které díky své větší **lehkosti**, tuhosti a pevnosti mohou přinést dalekosáhlé změny v inženýrství a konstruování. V současnosti jsou komposity využívány hlavně ke splnění některých požadavků supersonických letadel, průzkumu vesmíru a podmořského průzkumu ve velkých hloubkách. Ize očekávat, že posléze budou použity i na méně exotických místech, jako např. konstrukci staveb.

just past the city, large clouds hang in  
the air, but were not many, they are mostly  
over blossoms, which are pale brown, &  
are blossoming, which by the colors get along in quite  
hurry so I think, by the weather, fine, nothing, although I am  
advised, & I am not sure this will rain, the time will be  
continued in another month in the winter (all brown), except  
you shall be having fine weather, as soon as it does, nice distinct  
fins, fine weather, unseasonable, unseasonable, fine  
a nice clear weather, correct (fine, & under brown,  
most blossoms).

Stejně jako syntetické polymery i moderní komposity imitují přírodu. Dřevo je např. komposit sestávající z celulosových vláken (ohebných, ale pevných v tahu) a ligninu jako jejich pojiva k zajištění tuhosti materiálu. Kost je komposit z pevných, ale poddajných kolagenních vláken a tvrdého a křehkého apatitu. Moderní komposity dosahují, a dokonce účinněji, podobné výsledky např. při kombinaci uhlíkových vláken s epoxidovou matrix, nebo častěji při použití skelných vláken. Nicméně v jistém smyslu se komposity vyskytovaly prakticky u všech minulých i nynějších inženýrských materiálů: stará děla s dřevěnou hlavní opásanou mosazí, povlak oceli ochranným nátěrem a ped. Nynější koncepce kompositů je však jiná: elementární příklad je bimetalický článek užity jako termostat. Článek je proužek mosazi spojený pevně se stejným kouskem železa. Jsou-li oba kousky odděleny a jsou zahřány, roztahne se mosaz více než železo. Když jsou oba kousky spojeny dohromady a je ohřát takto vzniklý komposit, větší deformace mosazi nutí železo k ohybu, což vede i k ohýbání mosazi (viz obr.6). Průhyb je pak využit k indikaci teploty nebo ovládání vypínače.

Tento příklad ilustruje dvě vlastnosti moderních kompositů: první, že každý z obou materiálů sám by byl pro daný účel neužitečný, kombinace má zcela nové vlastnosti a druhý, že obě složky působí společně k dosažení stejného přetvoření na styku.

Pro inženýra navrhujícího supersonické letadlo stejně jako stavebního inženýra, je ideálem materiál pro nosné prvky velmi lehký, velmi tuhý, velmi pevný v tahu, nesnadno korodovatelný, s malým součinitelem teplotní roztažnosti a vysokou

odolnosti obrusu a s vysokým tavným bodem. Protože jsou žádány vždy v současných aplikacích tuhost s lehkostí a pevnost s lehkostí, je třeba uvažovat relativní hodnoty: tuhost a pevnost na jednotku váhy.

Obrázek 7 ukazuje srovnání některých materiálů z této hlediska. Je vidět, že pevné materiály, které jsou tuhé a lehké jsou keramické: sklo, grafit, safír, bor, křemičitý karbid. Kovy vypadají v tomto srovnání velmi slabě. I nejpevnější ocel - 7x pevnější než normální - je nevalný materiál z hlediska jednotkové váhy. Pryskyřice a polymery jsou dobré z hlediska pevnosti, špatné (dáleko více než kovy) z hlediska tuhosti. Navíc mají keramické materiály výhodnější další vlastnosti (tavný bod, součinitel tepl.roztažnosti) a mohou být vyrobeny z lacných základních surovin (písek, koks, uhli).

Důvod, proč dosud byly tyto materiály tak málo využívány až do objevu kompositů leží v tom, že jejich pevnost lze zjistit jen za speciálních podmínek. Nejdůležitější je, aby element byl bez vnitřních trhlin, měl velmi hladký povrch, bez trhlin a vrubů.

Relativní důležitost trhlin a vrubů u různých materiálů vynikne ze srovnání velikosti trhliny, která působí bezprostřední porušení pásu při napětí např.  $70 \text{ kP/mm}^2$ : u pevné oceli může být hloubka vrubů až 25 mm, u hliníku 0,16 mm a u skla jen 0,0025 mm. Měřítkem kvality materiálu není proto jen pevnost, ale i lomová práce, t.j. energie potřebná k jeho porušení. Všechny keramické materiály mají lomovou práci malou a jsou tím velmi citlivé na přítomnost trhlin, jsou křehké. Proti tomu polymery se chovají podobně jako kovy i když nemají tak vysokou pevnost, trhliny nemají velký vliv.

Chemickou příčinou značně vyšší odolnosti kovů a polyme-

rů vlivu trhlin proti keramice je, že meziatomové síly v kovech a mezimolekulární síly v polymerech nejsou pravidelně směrově orientovány. Navíc chemické vazby kovů a polymerů jsou nenasyčené, tj. atomy nebo molekuly takových materiálů jsou schopné tvořit nové spoje. Keramika má na druhé straně vysoce orientované meziatomové síly a nasycené vazby. V kovech a polymerech atomy nebo molekuly vždy po sobě kloužou v koření trhliny. Trhлина nemůže proto tak lehce proniknout vnitřní strukturou kovu nebo polymeru jako strukturou keramiky.

Proto se užívá keramických materiálů v moderních kompositech ve formě malých kousků, spojených dohromady matrix. Tím jakékoli trhliny se lokalizují, jejich pronikání materiélem je brzo v matrix utlumeno. Nejčastěji se používají keramická vlákna. Přitom vlastnosti matrix jsou enormě důležité: předně nesmí poškodit vlákna poškrabáním, jež způsobuje trhliny, dále musí působit jako medium, kterým je napětí přenášeno do vláken, musí být silně adhesivní, konečně matrix musí být dostatečně plastická, aby se mohla vytvářet <sup>plastická oblast</sup> v místě trhlin vláken a eliminovat šíření trhliny v kompositu.

Prvou vlastnost splňují např. polymer nebo některé kovy, jako hliník nebo měď. Matrix je přitom měkká ( s malou pevností ve smyku) a proto nepoškrábe vlákna. Pro splnění dvou druhých funkcí potřebuje matrix vlastnosti, které jsou do jisté míry protichůdné, takže je třeba v každém případě volit kompromis. Komposity nevyšších pevností obsahují seřazená vlákna. Je-li takový komposit namáhán rovnoběžně s vlákny, dojde ke spolupůsobení obou složek a jejich přetvoření je prakticky stejné.

Protože modul pružnosti matrix je podstatně menší než vláken, je potom napětí vláken úměrně větší; rozdíl je tak markantní, že na mezi únosnosti příspěvek matrix může být považován, že zanedbatelný. Když dojde v místě vrubu některého vlákna k jeho přetržení, nebude mít na komposit valný vliv: rozvoj trhliny je poměrně brzy měkkou matrix (vzhledem k vláknům) utlumen (obr.8). V krátké vzdálenosti od přetržení budou pak obě části stejného vlákna přenášet opět stejné zatížení, jako sousední neporušená vlákna ( obr.9 ).

Skutečnosti, že matrix přenáší v kompositu rychle napětí do porušených vláken, lze s výhodou využít k výrobě kompositu s velkým počtem krátkých vláken (uspořádaných směrově stochasticky). Tento způsob přináší i možnost využití nejpevnějších krátkých jednokrystalových vláken - whiskerů. Dále únosnost kompositu zvyšuje naprostá nepravděpodobnost, že by k přetržení všech vláken došlo v jednom příčném řezu a tím potřeba vytáhnout z matrix jednotlivě porušená vlákna. To je již skutečná vlastnost kompositu: nemůže být přisuzována žádné složce samotné. Konečně rozložení trhlin lze regulovat velikostí soudržnosti mezi vlákny a matrix. Je-li soudržnost malá, je komposit slabý ve směru kolmém k vláknům. To přináší ale výhodu v tom, že rozšíření trhlin v tomto směru je obtížné, trhliny se stočí podél slabých mezipovrchů a tím se zneškodní, přitom vlastnosti materiálu rovnoběžně s vlákny se nesníží.

Je-li komposit probíraného druhu stlačen, přirozeně se poruší vyboulením nebo smykiem. Vlákná by měla být maximálně tuhá a styčný povrch mezi vlákny a matrix by měl mít vysokou tahovou pevnost, aby se zabránilo rozštípnutí ( to je opačný požadavek než pro tahové namáhání ). Při namáhání smykem ( tj. ta-

hem šikmo k vláknům) je rovněž komposit méně pevný. Proto, aby se zajistila pevnost v různých směrech, pokládají se a spojují dohromady různě položené vrstvy.

Největší množství kompositních materiálů vláknitého typu je vyráběno ve tvaru skelných laminátů. Skelná vlákna jsou snadno dosažitelná, avšak velmi citlivá k působení vody, která drasticky redukuje jejich pevnost. Musí být proto opatřena dokončením ochranným povlakem. Výhodné je použít pro matrix pryskyřic, např. epoxidových nebo polyesterových, které nijak vlákna nepoškodí. Je možné dělat výrobky libovolné velikosti a různo-směrným navíjením nebo pokládáním přizpůsobit pevnost očekávanému namáhání. Skelné lamináty mají ale i některé nedostatky: skelné vlákno je sice velmi pevné, ale málo tuhé; proto nemohou být ze skelných vláken konstruovány ani křídla letadel ani mosty, dále pryskyřice hoří, rozkládá se nebo teče při teplotě řádu  $200^{\circ}\text{C}$ . Nejmoderněji může být tato nevýhoda redukována použitím např. polyimidových pryskyřic využívaných vláknů z čistého křemičitého skla; takové komposity snesou trvalé teploty více než  $300^{\circ}\text{C}$  ( po několik dní ). Teplotní omezení užitelnosti skelných laminátů vnáší ovšem i sklo samé, neboť ztrácí svou pevnost při teplotách vyšších než  $400^{\circ}\text{C}$ .

Tužší vlákna, např grafitu, boru nebo křemičitého karbidu (více než dvakrát tužší než ocel ) nahrazující sklo, mají i vyšší bod tání. Takové materiály byly již úspěšně vyrobeny a aplikovány; často se při vysokých teplotách vypaří namísto roztaží. Tyto komposity mají tuhost na jednotku váhy mnohem větší než ocel. Vzhledem k pevnosti vláken i pevnost kompositu na jednotku váhy převyšuje pevnost oceli.

Z úspěšných aplikací těchto kompositů zaslouží vzpomenout např. kompositů z grafitových vláken v epoxidové pryskyřici pro pevné a tuhé tlakové lopatky v lehkých tryskových motorech nebo z vláken boru v epoxidové pryskyřici pro rotorové vrtule helikoptéry. Není-li váhové omezení, pak jsou výborná tungstenová vlákna, která vynikají vysokou pevností až do více než  $1500^{\circ}\text{C}$ , pro kompozity s kovovou matrix, kterou mohou výhodně tvořit kovy kobalt nebo nikl.

Rovněž kompozity využívané whiskery, vyrobené zatím jen laboratorně, ukázaly pozoruhodné vlastnosti.

Praktická aplikace vláknitých kompositů je nerozlučně spojena s problémy inženýrského návrhu. Nové materiály jsou ideální pro přenášení velkých tahových napětí a tedy skutečně vítané pro vhodně navržené, pokrokové, inženýrské konstrukce.

Další neméně významnou skupinou kompositních materiálů (z řady ostatních - viz obr. 10) jsou materiály s dispergovanými částicemi, ať již ve formě segregované nebo agregované, t.j. materiály s jasně rozlišitelnou makrostrukturou.

Protože základní strukturální principy platí na všech úrovních, můžeme s výhodou využít zejména poznatků dosažených výzkumem tzv. mikrokosmu - mikroskopické struktury i v makrostruktuře materiálů. Nestačí ovšem jen mechanická aplikace.

Základními rysy těchto granulárních, nebo jinak řečeno makro-dispersních, materiálů jako systémů je jejich struktura a přitomnost vnitřních mezifázových rozhraní, jež jsou spolu hlavními určujícími faktory jejich vlastností. Mění-li se vzájemný objemový poměr jednotlivých fází, mění se silně i oba faktory a dochází k nápadné, kvalitativní odlišnosti vlastností.

stí materiálů, jak ukazuje obr. 11 na příkladu systému polymerové pojivo - anorganické plnivo, krátce plastbetonu. Tento poznatek vede k závěru o nutnosti specifického studia kompositů v několika oddělených oblastech.

Bylo nalezeno, že makrodispersní materiály se chovají při vnějším namáhání odlišně především podle toho, zda dispergovaná tuhá fáze je segregována nebo agregována. U systému s agregovanou pevnou fází je pak bezprostředně rozhodující, zda tekutá fáze je přetržitá či spojitá, jinými slovy, je-li v superstruktúre x) rozmezí mezi tuhou a tekutou fází uzavřené či otevřené xx).

Na tomto základě lze rozdělit materiály - s běžným rizikem zkreslení z jednodušením - do čtyř základních oblastí, které omezuje opět mezných systémů ( viz obr. 12 ).

V prvé oblasti ( plněné pojivo ) převzahuje pevná fáze b, tvořící dispersní prostředí ( matrix ). Částice dispergovaných fází a jsou v matrix segregovány ( vzdáleny o více než  $2 \text{ } \text{Å}$  r , je-li r minimální obalová vrstva částic s hlediská kohesní

---

x) Superstrukturou je miněna struktura systému, na rozdíl od vlastní struktury jednotlivých jeho složek

xx) Dále pak rozhoduje, je-li dostatek dispersní fáze pro vytvoření souvislé matrix či nikoliv; v prvním případě je makrodispersní materiál tuhý, ve druhém sypký.

energie, jak ukazuje obr. 12 b. Oblast je ohrazena prvním mezným systémem, který naobsahuje žádné dispergované částice, superstruktura je totožná s infrastrukturou dispersního prostředí ( obr. 12a ), a druhým mezným systémem, skládajícím se z agregátu dispergovaných částic ( tedy vzdálených o  $2\Delta r$  ), doplněného dispersním prostředím k vytvoření plného materiálu ( obr. 12c ). V této oblasti není přítomna v superstruktuře tekutá fáze ( s výjimkou tekutiny na úrovni strukturních systémů ). V dalších oblastech zůstává již hustota dispergovaných částic v soustavě konstantní, maximální, částice jsou agregovány.

Ve druhé oblasti ( pojené plnivo ) přistupuje na úkor dispersního prostředí do superstrukturního systému tekutá fáze c. V této oblasti , ač poměrně úzké ( co do hustoty systému ) se vlastnosti systému rychle a značně mění. Tekutá fáze se zde vyskytuje v uzavřených prostorách ( obr. 12 d ). Později se tyto prostory spojují, až se vytvoří spojitý infrastrukturní systém tekuté fáze; tím je dán třetí mezný systém ( obr. 12e ).

Ve třetí oblasti ( pojené plnivo ) se nadále zvětšuje podíl tekuté fáze na úkor dispersních prostředí ( obr. 12e ). Superstrukturní systém je průlínčitý a vzniklý nový infrastrukturní systém z kapalné fáze je závislý na okolním prostředí. Infrastruktura dispergovaných fází zůstává i nadále v nezměněné hustotě až ke čtvrté mezní soustavě, v níž se počne pro nedostatek primérního dispersního prostředí superstrukturní systém rozdělovat do shluků, mezi nimiž zůstává ( v závislosti na okolním prostředí ), nejvýš sekunderní dispersní prostředí - tekutá fáze ( obr. 12f ).

Ve čtvrté oblasti hustota dispergované infrastruktury se zvyšuje, superstrukturní soustava, mající původně charakter tuhé-

ho, soudržného materiálu, se mění k materiálu sypkému, nesoudržnému, nejdříve hrubozrnnému ( složenému z velkých shluků použitých strukturních systémů) až k jemnozrnnému (složenému pouze z dispergovaných strukturních systémů). Tento systém za úplné nepřítomnosti primerního dispersního prostředí (matrix) je zřejmě posledním, pátým mezným systémem ( obr.12g ). V případě suchého okolního prostředí není v superstrukturním systému na této mezi přítomna ani tekutá fáze a superstrukturní systém je totožný se skutečným infrastrukturním systémem dispergované fáze agregátu.

Schematicky je podle uvedeného znázorněno roztrídění kompositů a složení superstrukturní soustavy na obr. 13.

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

Kromě toho pochopitelně jsou závislé na všech časových faktorech, tj. zejména stáří a historii jednotlivých fází, stáří a historii superstruktury, rychlosti změny okolních fyzikálních podmínek, rychlosti vnějšího zotěžování atd.

Ukázalo se, že makrostruktura je hlavní určující faktor vlastností, přičemž mikrostruktura fází ovlivňuje zejména situaci na vnitřním rozhraní. Mezifázová hranice je druhý rozhodující faktor a to kvantitativně i kvalitativně. Dále, vnitřní napjatost ( ať už primérní - jako vlivem tvrdnutí nebo sekunderní - vlivem vnějšího namáhání ) je další důležitý faktor, ovlivňující vlast-

nosti materiálu; v této souvislosti zaslouží zdůraznit, že jisté množství pórů uvnitř materiálu je výhodné pro vnitřní napjatost a tedy materiálu prospěšné.

Na základě těchto poznatků jsou nyní vytvářeny teorie, pravdivěji popisující pružnost a pevnost heterogenních materiálů. Opět hlavní roli v těchto nových popisech hraje struktura systému.

Tak např. lze určit vlastnosti materiálu v 1. oblasti podle vlastnosti fází a jejich objemového zastoupení vhodnou (záženou) kombinací dvou modelů idealizovaných strukturálních soustav, tzv. měkké a tvrdé.

Měkký systém je složen z vrstev (materiálů s vlastnostmi jednotlivých fází), které jsou kolmé ke směru působícího namáhání (obr. 14a). U tvrdého systému jsou naprotitomu uspořádány vrstvy rovnoběžně se směrem působícího namáhání (obr. 14 b). Např. u dvoufázového systému, kde  $E_1, E_2$  a  $V_1, V_2$  jsou moduly pružnosti a Poissonův součinitel a  $P$ ,  $(1-P)$  objemové množství jednotlivých fází, lze vyjádřit pružností charakteristiky kompositního materiálu ve tvaru H-D-N (Hirch-Dougill-Navrátil)

$$E = \frac{2}{B} E_1 E_2 C$$

$$V = \frac{1}{B} \left\{ \left[ V_2 (1-P) E_1 + V_1 P E_2 \right] C + E_1 E_2 \left[ V_1 (1+V_2) \dots \dots (1-2V_2) P E_1 + V_2 (1-\frac{1}{2}V_1) (1-2V_1) (1-P) E_2 \right] \right\}$$

kde

$$B = \left[ (1-P) E_1 + P E_2 \right] C + E_1 E_2 (1+V_2) (1-2V_2) P E_1 + (1+V_1) (1-2V_1) (1-P) E_2$$

$$C = \left[ (1+V_2) P E_1 + (1+V_1) (1-P) E_2 \right] / \left[ (1-2V_2) P E_1 + (1-2V_1) (1-P) E_2 \right]$$

Vlastnosti dvoufázového materiálu ve 3. oblasti, který vlastně tvoří agregát jedné fáze spojený můstky druhé fáze za přítomnosti spojitéh pórů, mohou být modelovány systémem koulí, uspořádaných tetrahedricky (v nejtěsnějším uspořádání) /obr.15/. Pružnost tohoto systému ( tj.  $E_0$ ,  $\nu_0$  ) po dalším zjednodušení na ortogonální soustavu (podle obr.16), s použitím vztahů H-D-N, popisují v suchém stavu další vztahy :

$$E_0 = \frac{6}{D} a^2 E ; \quad \nu_0 = \frac{1}{D} (-3a\nu + H + J)$$

kde

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

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

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

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

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

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

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

$$a = \sqrt{\frac{Pv_s}{3(1-b)}} ; \quad b = \sqrt[3]{(1-B)v_s}$$

kde  $P$  je objemové množství pojiva v tuhém skeletu,  $v_s$  znamená objemovou část tohoto skeletu v celém uvažovaném systému.

Ve zcela nasyceném stavu vodou ( zcela zaplněných pórech) opakovanou aplikací vztahů H-D-N, naleznou se pak vztahy pro pružné charakteristiky materiálu ve tvaru

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{E + (1-2V) (1-V_s) E_f}{(1+V_f)(1-2V_f) V_s^2 E + (1+V) (1-2V) (1-V_s) E_f} \\
 V &= \frac{(1+V_f) (1-2V_f) V_s^2 E + V_f (1+V) (1-2V) (1-V_s) E_f}{(1+V_f) (1-2V_f) V_s^2 E + (1+V) (1-2V) (1-V_s) E_f} \\
 E_{f_0} &= \frac{(1-V_s) E_E_0}{E - E_0} \quad V_{f_0} = \frac{E - E_0}{E - E_0} \\
 E_f &= E_{f_0} - \frac{E_{f_0}}{E_{f_0} + 2 (1+V_{f_0}) (1-2V_{f_0}) K_1} \\
 V_f &= \frac{V_{f_0} E_{f_0} + (1+V_{f_0}) (1-2V_{f_0}) K_1}{E_{f_0} + 2 (1+V_{f_0}) (1-2V_{f_0}) K_1}
 \end{aligned}$$

Kde  $K_1$  je objemový modul tekutiny zaplňující pory.

Podobně, ale v daleko složitější formě se obdrží i vztahy určující pevnost těchto materiálů.

Obecně pružnost materiálu je funkcí času a předchozí výrazy platí přesně jen pro případ nulového času historie materiálu i fázi, nebo jsou-li zeváděné konstanty pružnosti složek materiálu známé pro libovolný čas, pro případ nulového času historie materiálu <sup>x)</sup>. Podle toho lze vpředu odvozené hodnoty uvažovat za základní (prvotní, výchozí) pružnostní konstanty.

Protože dle pružnosti i jiné vlastnosti materiálu jsou funkcií času, je nezbytné pro objektivní hodnocení materiálu nalézt definovat novou konstantu, vycházející z energetického hodnocení systému. Takovému postupu nejlépe vyhovuje podle x). V důsledku např. časové závislosti na kontaktních napětích (na rozhraní )

názoru/ elastance, t.j. schopnost materiálu být pružným v libovolném stadiu své existence. Tato schopnost je postupně ztrácena, vyčerpávána opakováním namáháním ( opakováním nebo dlouhodobým zatížením, teplotou, vlhkostí a pod.). Elastanci je možné z tohoto hlediska chápout za základní kvalitativní charakteristiku pružnosti.

Pro kvantitativní popis elastance materiálu byla zavedena nová elastická konstanta, nazvaná absorbent pružnosti, jež je funkcí složení ( definice ) materiálu M a jeho historie H, zahrnující vliv času, teploty, směru a způsobu zatížení, vnitřní napjatosti atd., tj.

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

V předchozím bylo ukázáno, že složení strukturního materiálu je definováno jeho základními pružnostními konstantami E a V. Lze tedy rovněž psát

$$A = F / (E, V), H / .$$

Podle zavedené definice náleží každému definovanému materiálu jediný absorbent pružnosti. Jeho maximální hodnota v daném systému odpovídá teoreticky ideálnímu materiálu; přetvořený, porušený ( např. vnitřně ) nebo jinak unavený materiál má nižší hodnotu absorbantu pružnosti. Změna absorbantu pružnosti během přetváření je nepřímo úměrná změně vydané ( ztracené ) energie. Maximální hodnota v ideálním materiálu odpovídá celkové energii porušení ( destrukční či dehenské energii ), nulová hodnota materiálu plně porušenému.

Praktickým měřítkem pružnosti může být např. poměr trvalých a pružných deformací při vnějším namáhání. Sleduje se současně deformace příčné a podélné při jednoosém namáhání, potvrdí se, že komposity různého složení mají sice různý, ale napřekročitelný absorbent pružnosti: zvětšené složce lineární elastance v podélném směru odpovídá zmenšení složky lineární elastance v příčném směru a naopak ( obr. 17). Hmota se chová, jako by mohla ( při jistém namáhání ) absorbovat jen jisté ne-překročitelné množství energie ( vyjádřené velikostí trvalých deformací). Toto množství může být patrně náhodně ( nebo v závislosti na dalších příčinách, jako vnitřní napjatosti, poměru jednotlivých fází a pod.) absorbováno někdy dříve během přetvoření v podélném směru, někdy v příčném směru. S rostoucím napětím se logicky elastance zmenšuje, tedy absorbent pružnosti se zvětšuje. Z tohoto pohledu lze dojít k představě konečné pevnosti, jež je dána komulací spotřebované energie, vyjádřené absorbentem pružnosti. Protože absorbent pružnosti je funkcí všech konvenčních materiálových charakteristik, může být i základem jejich popisu.

Funkcionální analýsa této konstanty a její vztah ke konvenčním materiálovým charakteristikám nepochyně si vyžadá ještě další objem úsilovné práce řady vědců; nicméně perspektivní možnosti popisu vlastností každého materiálu jednou konstantou jsou nadmíru přitažlivé.

Texty k obrázkům

---

Obr 3 - Atomy jsou představovány ( nahoře ) schematicky jako vnitřní elektronové " jádro " ( šrafováno ) s vnějšími valenčními elektrony ( černé kroužky ).  
Podle realističtější představy je kolem jádra ( nukleonu ) elektronový oblak. Atomy ve spodní části obrázku jsou kresleny v měřítku odpovídajícím jejich velikosti, jestliže jsou elektricky neutrální.

Obr.2 - Schematické znázornění pěti typů vazeb, které drží materiály pohromadě. V iontové vazbě atomu buď ztrácí nebo získávají jeden elektron tak, aby jejich vnější elektronový obal byl kompletní. Nemohou se proto o elektrony dělit, ale protože jsou elektricky nabity v důsledku získání nebo ztráty elektronu, jsou atomy opačného znaménka přitahovány.

V kovalentní vazbě páry atomů se dělí o své vnější elektrony k doplnění svých vlastních vnějších obalů.

V kovové vazbě všechny atomy se dělí o všechny valenční elektrony.

Molekulární vazba, také známá jako Van der Waalsova, vzniká z přemístění náboje uvnitř elektricky neutrálních atomů nebo molekul, které způsobuje slabou přitažlivost mezi nimi jakmile se navzájem přiblíží.

Vodíková vazba, také slabá, je zprostředkována vodíkovým atomem a je možná pouze z důvodu jeho malé velikosti a lehkosti, se kterou náboj může být přemístěn.

Všechny tyto vazby jsou idealizovány; ve většině materiálů existuje některá jejich kombinace.

Obr.1 - Všechny krystalické pevné látky jsou tvořeny některým ze 14 systémů krystalů, daných geometrickým uspořádáním. Kterékoli toto jejich uspořádání opakované v prostoru vytvoří prostorovou strukturní mřížku, charakteristickou pro každý materiál.

Krystalové systémy jsou :

- a) jednoduchá krychlová soustava
- b) prostorově centrovaná krychlová soustava
- c) plošně centrovaná krychlová soustava
- d) jednoduchá kosočtverečná (rhombická) soustava
- e) osově centrovaná kosočtverečná soustava
- f) prostorově centrovaná kosočtverečná soustava
- g) plošně centrovaná kosočtverečná soustava
- h) jednoduchá trojklonná soustava
- i) klencová ( rhomboedrická ) soustava
- j) šesterečná ( hexagonální ) soustava
- k) jednoduchá jednoklonná soustava ( monoklinická )
- l) osově centrovaná jednoklonná soustava
- m) jednoduchá čtverečná ( tetragonální ) soustava
- n) prostorově centrovaná čtverečná soustava

Obr.4 - Systém polymerových řetězců zahrnuje amorfne uspořádání

- (a) a různé formy krystalisace. Může být krystalisace mezi řetězci(b) a také řetězcová skladba, což je krystalisace řetězců samých. Řetězcová skladba může mít lamínární formu (c) nebo spirální formu (d).
- Spirální forma může být buď levotočivá nebo pravotočivá. Převážně amorfni polymer je měkký, elastický a propustný tekutinám. Polymer s převážně krystalinickou strukturou je znatelně plnější a tužší.

Obr.5 - Kombinace různých strukturních uspořádání umožňuje získat polymery různých vlastností. Každý roh trojúhelníka reprezentuje jeden ze tří základních principů pro vznik polymeru tuhého a teplotně odolného; strany a střed trojúhelníka indikují různé kombinace principů. Tabulka pod obrázkem dává příklady na použití.

Obr.6 - Princip komposita je demonstrován bimetalickým proužkem používaným v termostatech. Jestliže pásek mosazi a železa, stejných rozměrů (nahore) jsou hřívány zvlášť (uprostřed), mosaik se roztahne více než železo.

Jestliže pásky jsou spojeny a ohřívány (dole), větší roztažení mosazi způsobí ohyb železa a ohybání železe vyvolá zkřivení mosazi. Tento účinek nemůže být získán žádnou složkou samostatně.

Obr.7 - V grafu jsou srovnány pevnost a tuhost různých materiálů. Pevnost (vlevo) je dána největší délkou, ve které volně visící tyč se udrží bez porušení; v případě boru to je 303 km. Tuhost (vpravo) je reprezentována hodnotou relativní tuhosti na jednotku váhy.

Obr.8 - Je ukázán účinek matrix na tlumení trhliny v kompositu z tungstenových vláken v mědi. Tungstenová vlákna (bílé pásy) se přetrhly při namáhání materiálu ve směru vláken; měď nikoliv. Tmavé oblasti v mědi ukazují, že matrix tlumí trhlinkování smykovou deformací.  
Pohyb trhliny byl od leva do prava.

Obr.9 - Přetržená vlákna v kompositu vyztuženém vlákny způsobí jen malé škody. Důvod vyplývá z horního schematického obrázku s jedním přetrženým a dvěma celými vlákny v matrix. Když praskne střední vlákno při osovém namáhání

-( podle plných šipek ), obě části vlákna, které se chtějí od sebe vzdálit, jsou drženy smykovými silami (čárkované šipky) v obklopující matrix. Průběh sil na přetrženém konci vlákna je ukázán detailněji ve spodní části.

Obr.10 -Namísto přizpůsobování jednoho materiálu inženýrovým potřebám jsou vytvořeny vhodné materiálové systémy řadou kompositů. Je použita různé cesty složení dvou nebo více materiálů k vytvoření kompositu. Techniky již dlouho používané jsou v levo; způsoby napravo jsou relativně nové.

Obr.11 -Schema změny různých vlastností dvoufázových makrodispersních soustav v závislosti na váhovém poměru obou pevných fází. Počátek souřadnic v každém diagramu označuje samotné pojivo (matrix) směrem doprava matrix systému plynule ubývá na úkor třetí, kapalné fáze.

Obr.12 -Schema strukturních systémů makrodispersních soustav ve čtyřech oblastech, v závislosti na zastoupení obou pevných fází v jednotce objemu kompositu.

Obr.13 -Klasifikace a uspořádání superstrukturních systémů.

MS - mikrostruktura ( substance )

S - struktura

IS - infrastruktura materiálu

SS - superstruktura

Obr.14 -Měkký ( vlevo ) a tvrdý ( vpravo ) strukturní modelový systém dvoufázový. Spojení na styku obou fází se předpokládá dokonalé a obě fáze mají modul pružnosti  $E_1$ ,  $E_2$  a Poissonův součinitel  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ . S značí napětí, e je přetvoření

Obr.15 - Objemová jednotka průlínčitého materiálu typu pojeneho plniva . Mezikulové mosty jsou tvořeny matrix, vlastní koule je dispergovaná částice.

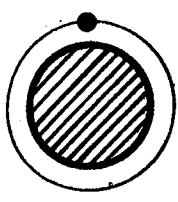
Obr.16 - Objemová jednotka zjednodušená do ortogonálního systému.

Obr.17 - Poměr trvalých  $\epsilon_{tr}$  a pružných  $\epsilon_e$  deformací v osovém ( plné čáry ) a příčném ( čárkované čáry ) směrech. Napěti je jedna třetina pevnosti.

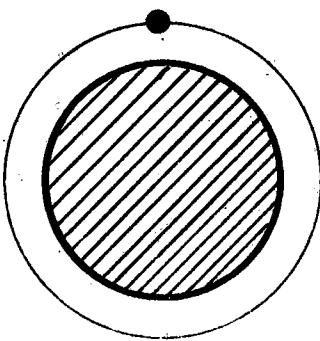
A - epoxidový plastbeton

B - polyesterový plastbeton

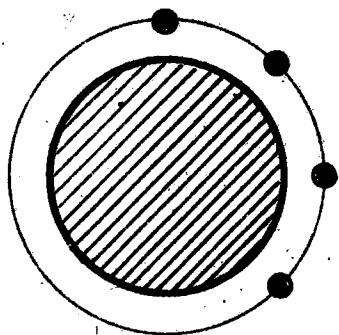
C - furanový plastbeton



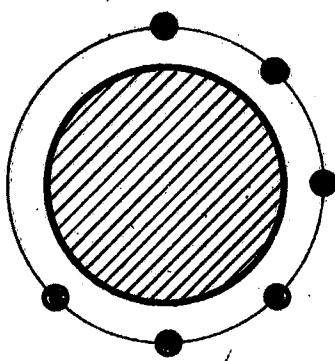
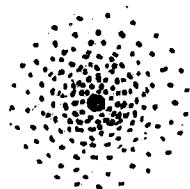
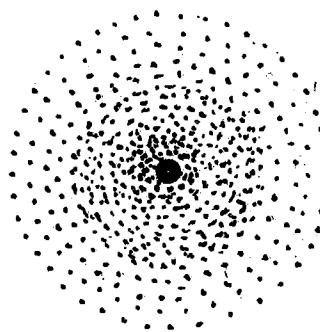
VODÍK



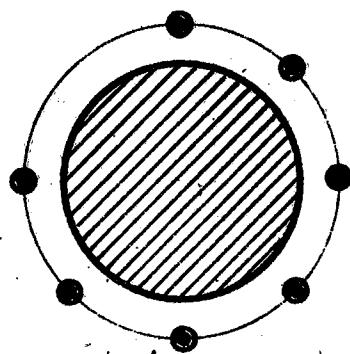
SODÍK



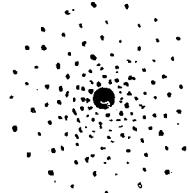
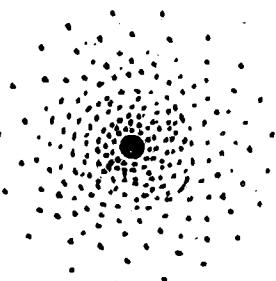
UHLÍK



KÝSLÍK

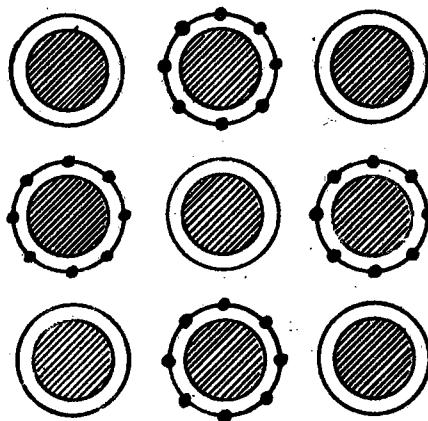


CHLOR



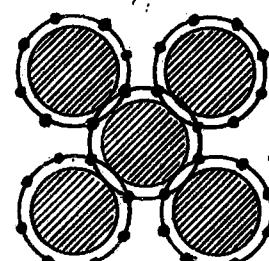
JONTOVÁ VAZBA :

CHLORID SODNÝ



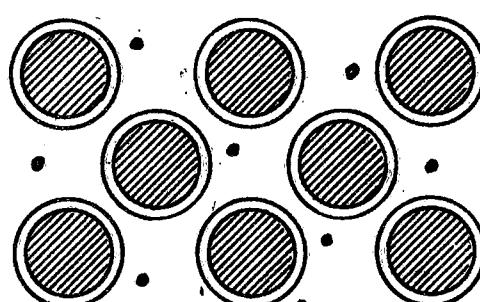
KOVALENTNÍ VAZBA :

DIAMANT



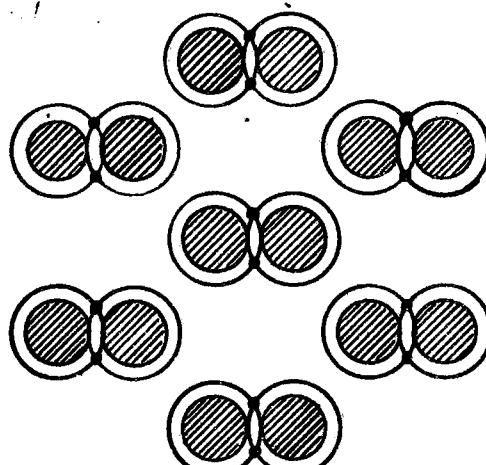
KOVOVÁ VAZBA :

SODÍK



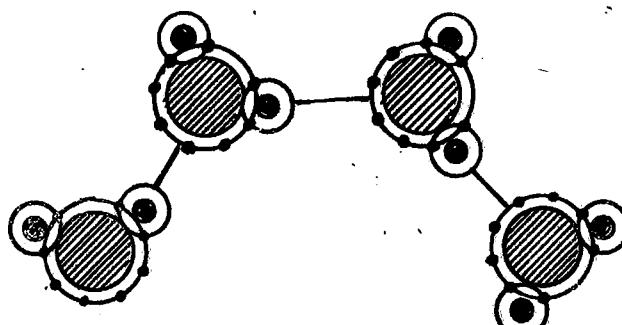
MOLEKULÁRNÍ VAZBA :

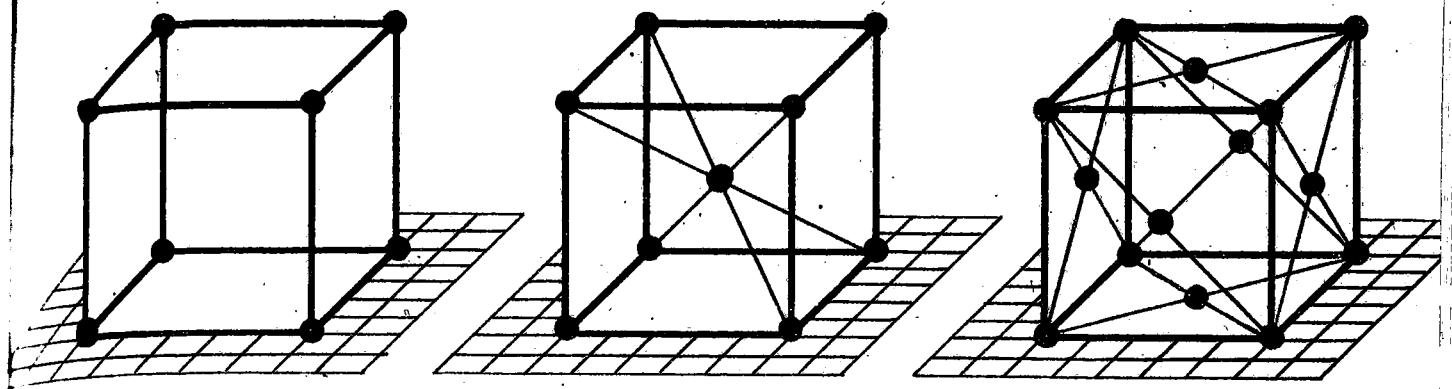
$H_2$



VODÍKOVÁ VAZBA :

LED

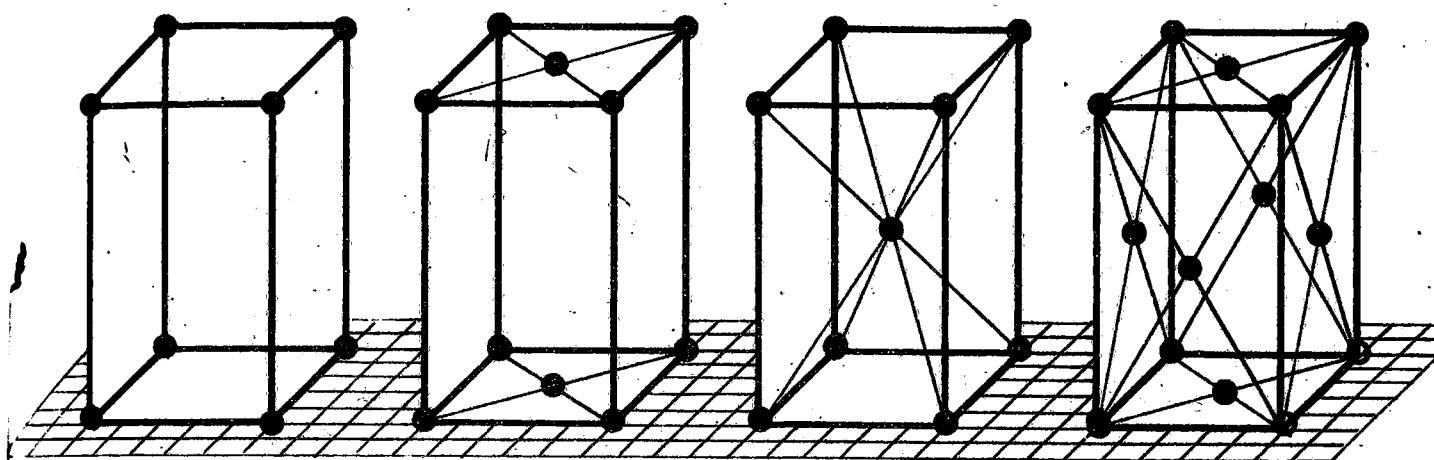




a

b

c

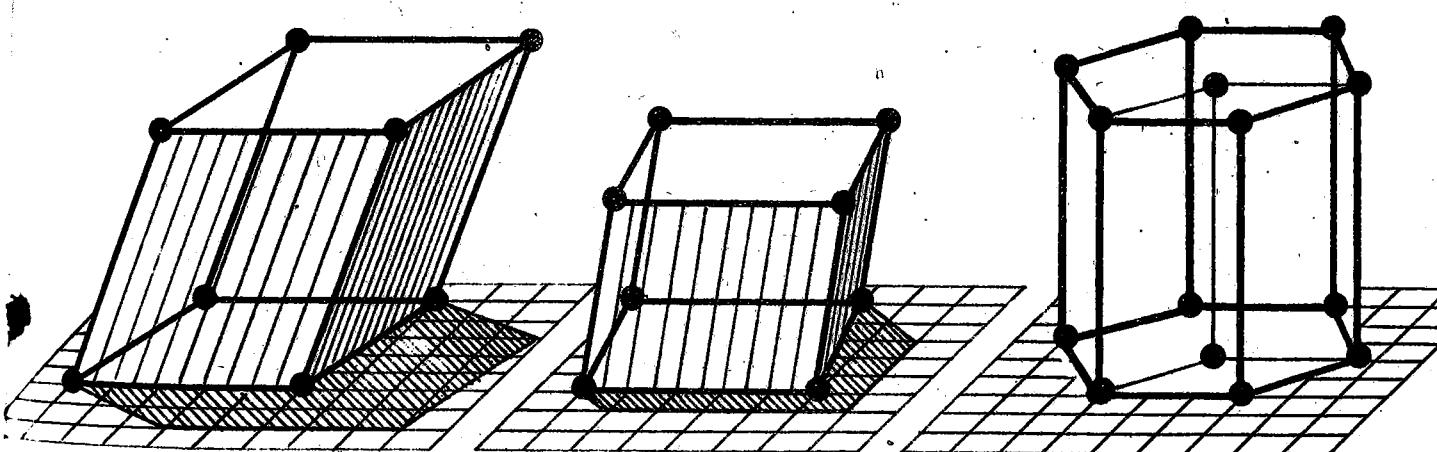


d

e

f

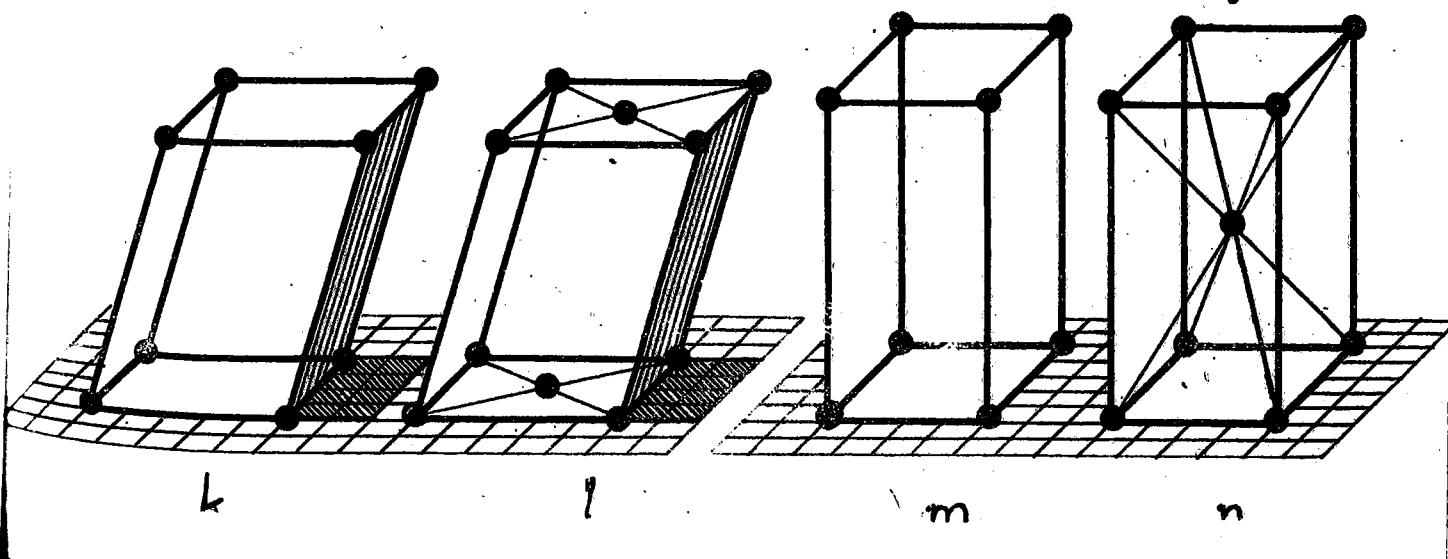
g



h

i

j

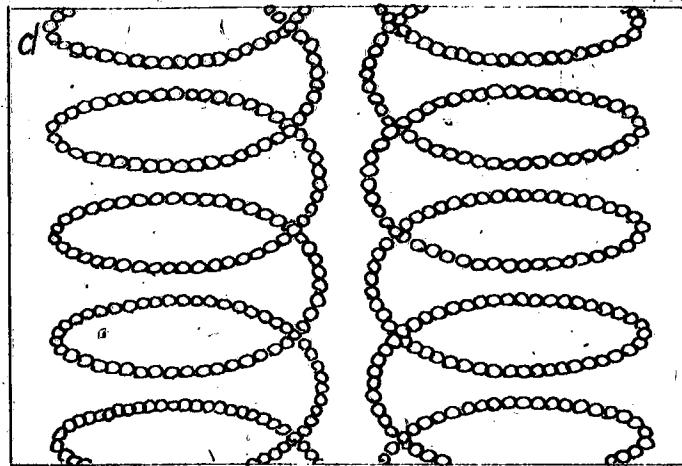
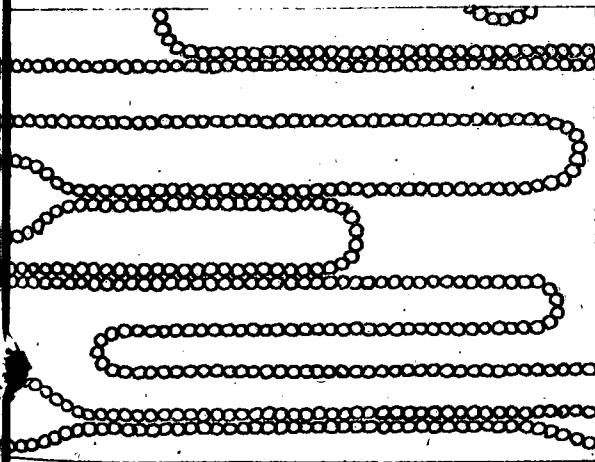
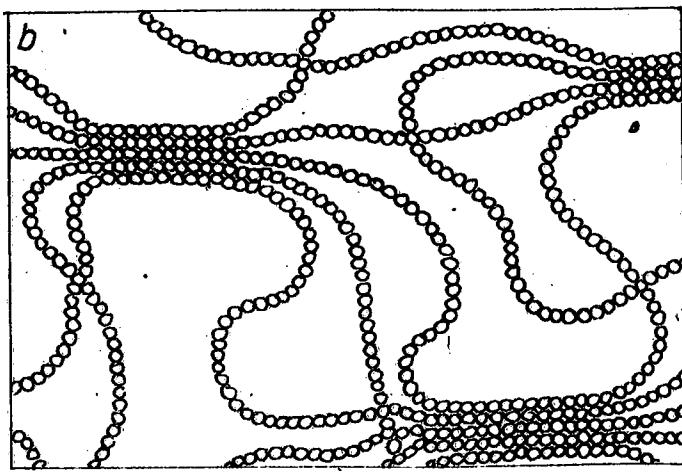
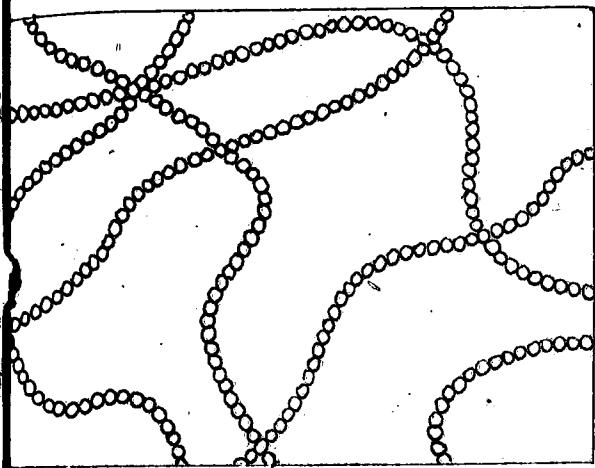


k

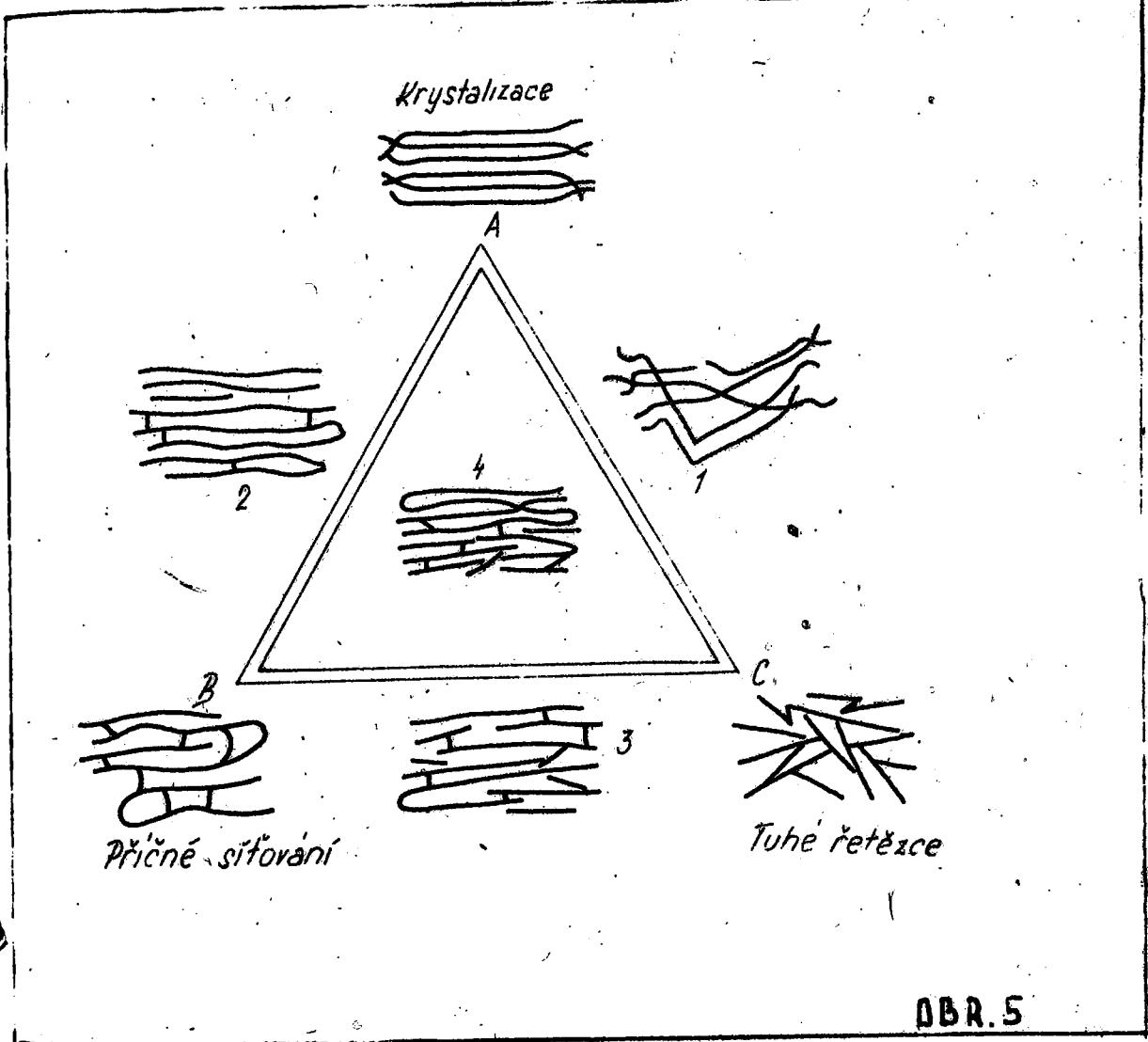
l

m

n



DBK.4  
MATERIALY



DBR.5

MATERIAŁY

mosaz

železo

mosaz

železo

mosaz

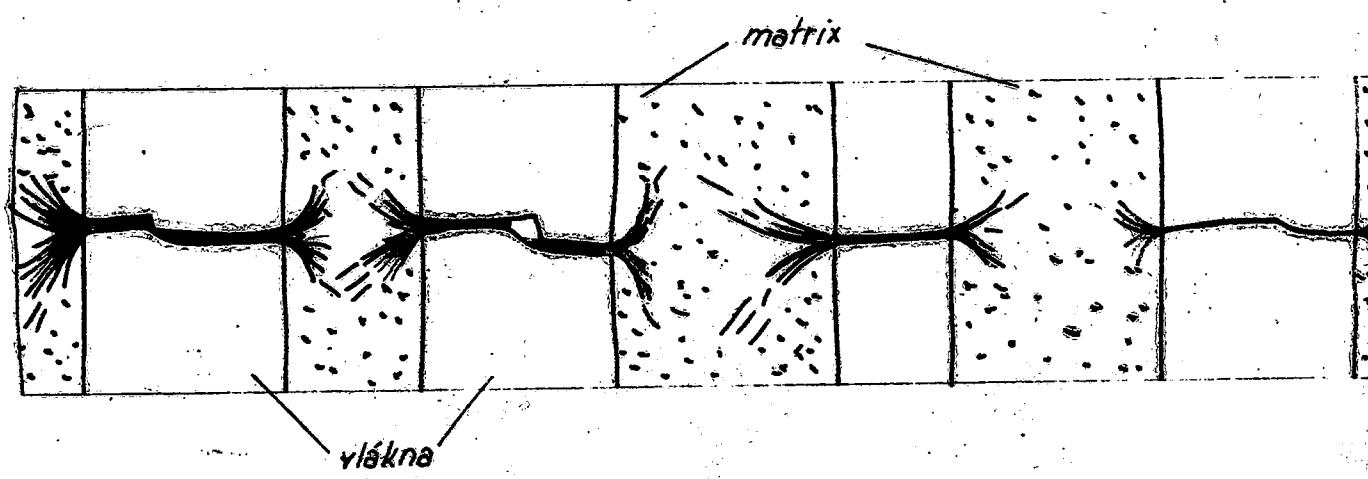
železo

DBR.6

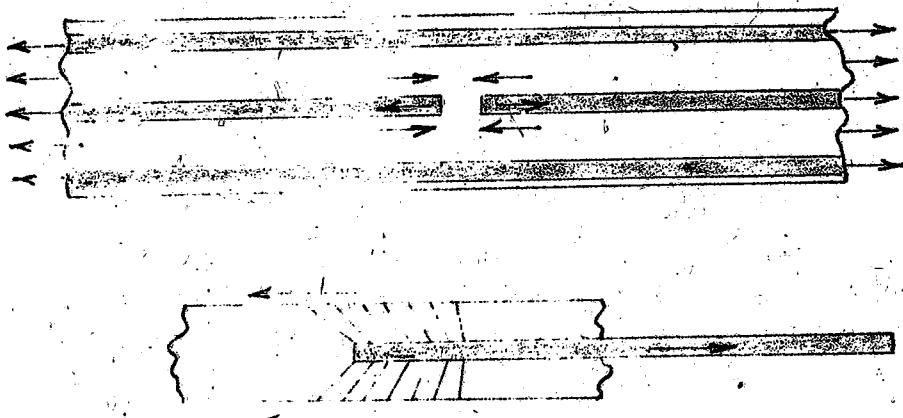
MATERIAŁY

bor	
křemičitě sklo	
grafit	
safir	
nylon	
křemičitý karbid	
ocelové klavírní struny	
hliník	
grafit	
bor	
křem. karbid	
safir	
ocel. klavírní struny	
křemič. sklo	
hliník	
nylon	

MATEŘSKÁ  
ŠKOLA  
OBRAZ

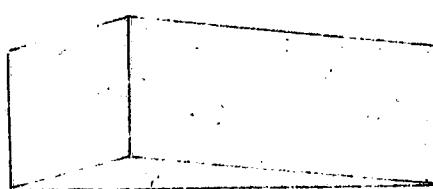


OB.R.8  
MATERIALY

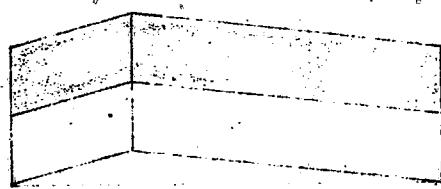


DBR. 9

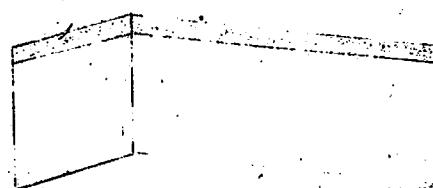
MATERIALY



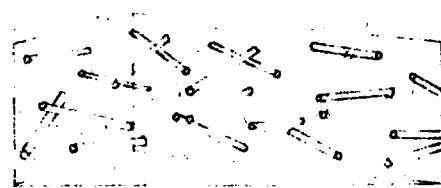
1) Slitina



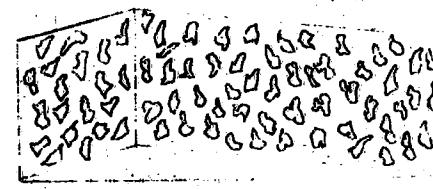
5) Spojování



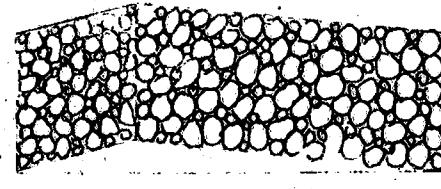
2) Nátěry nebo jiné povrchové úpravy



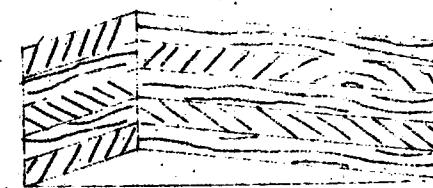
6) Vyztužení vlákniny



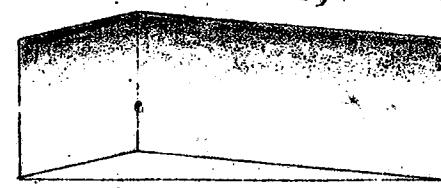
3) Dispersa



7) Makrodispersní (granulární) systém



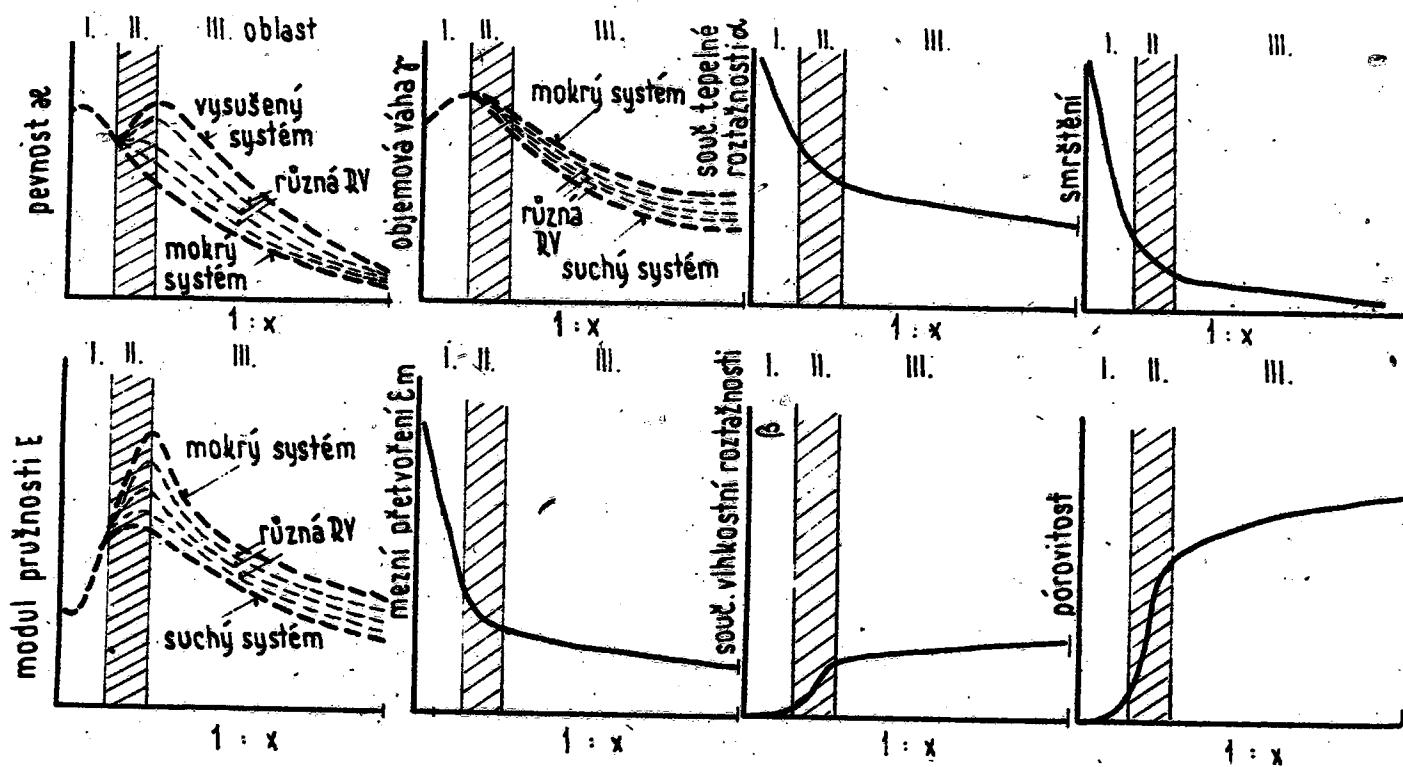
4) Laminace do vrstvených materiálů



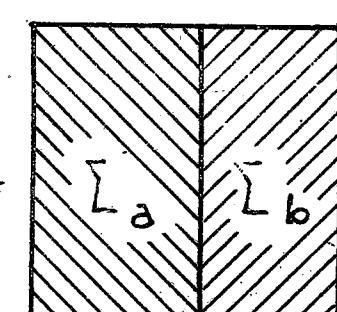
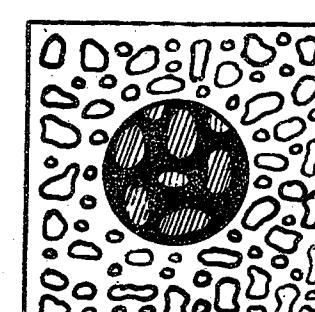
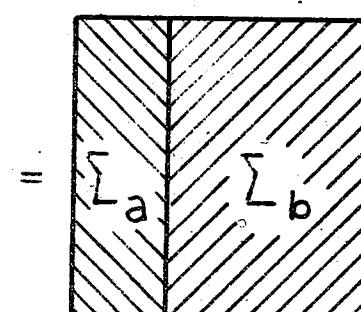
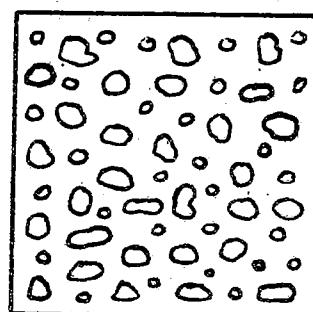
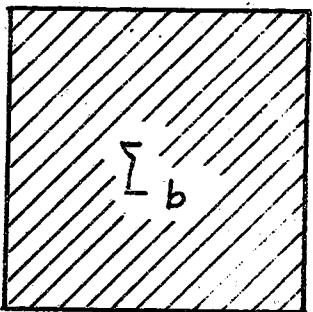
8) Difuse (permetrace)

Obr. 10

MATERIAŁY



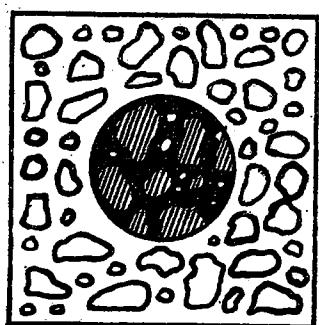
Obr. 11



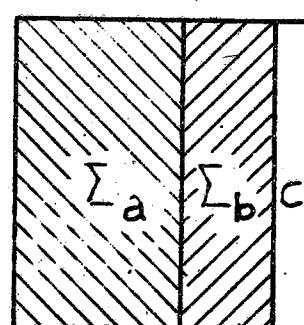
a

b

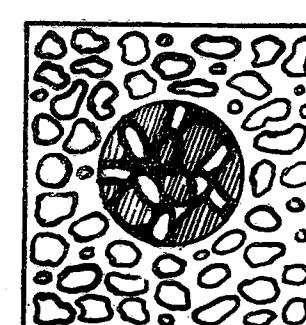
c



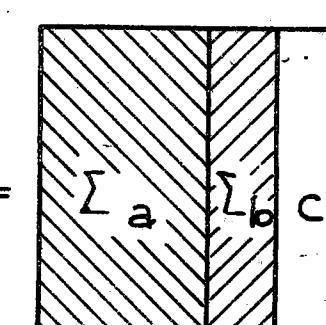
=



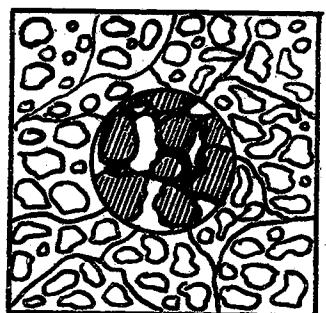
d



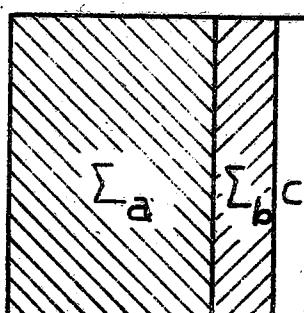
=



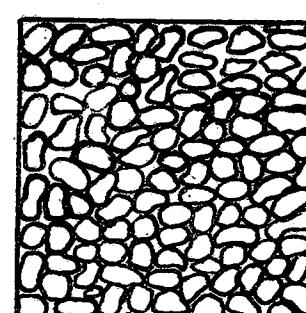
e



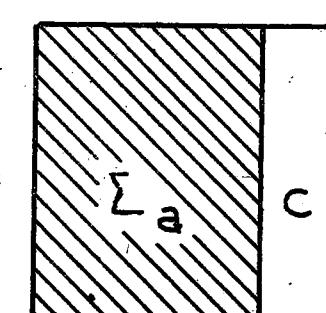
=



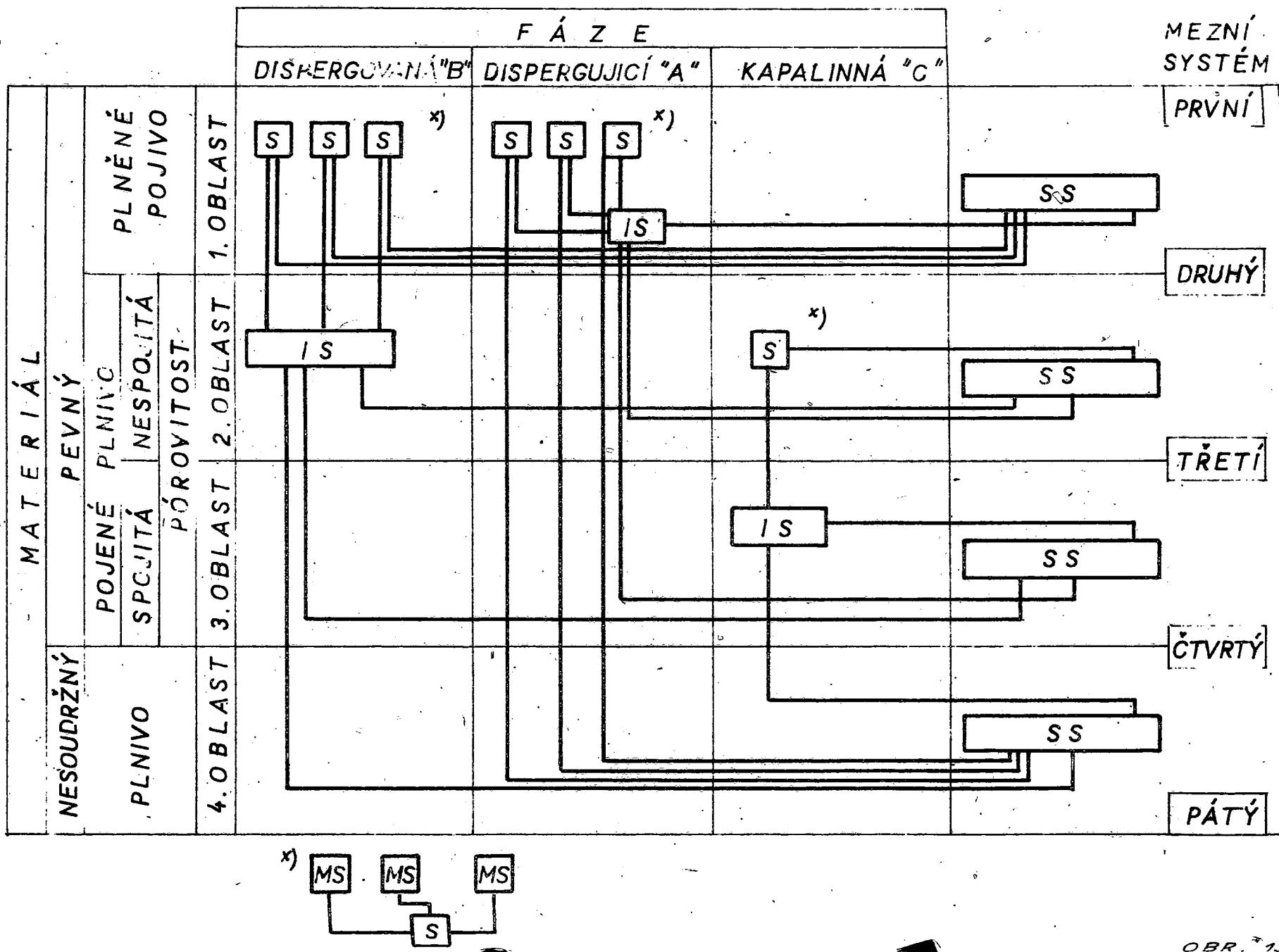
f

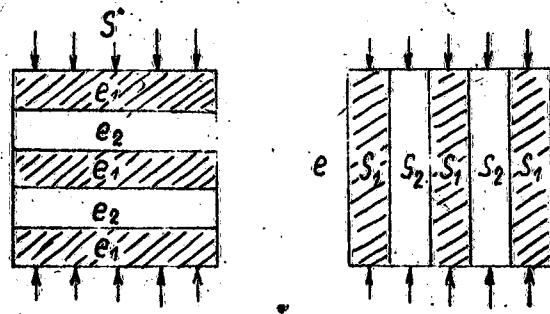


=

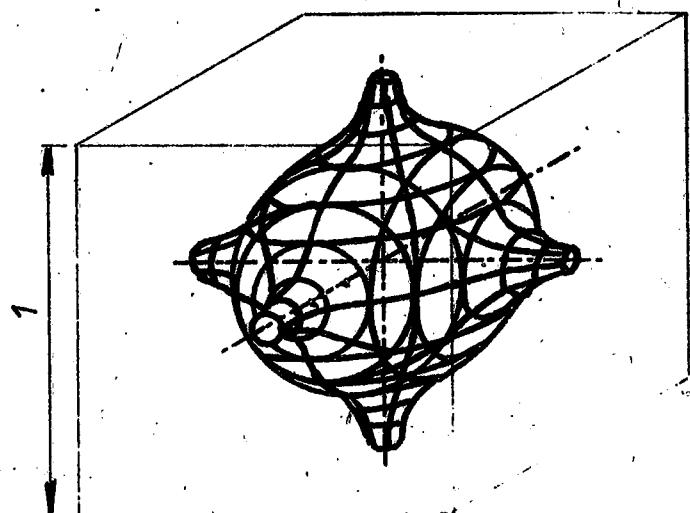


g

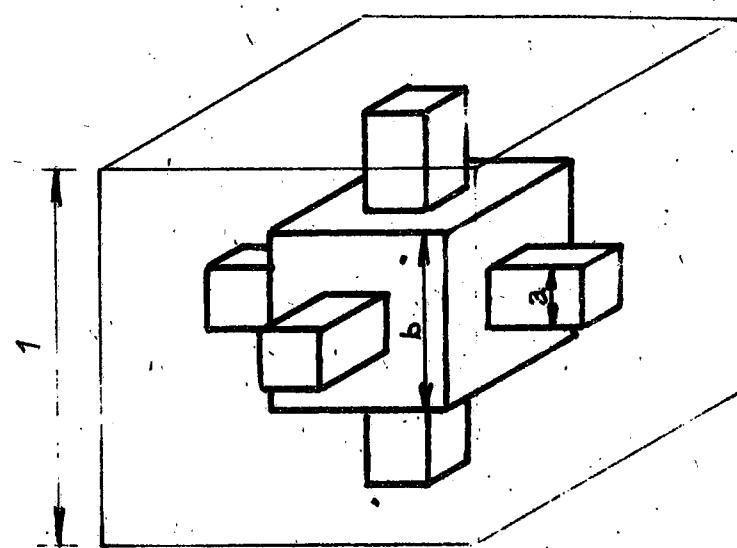




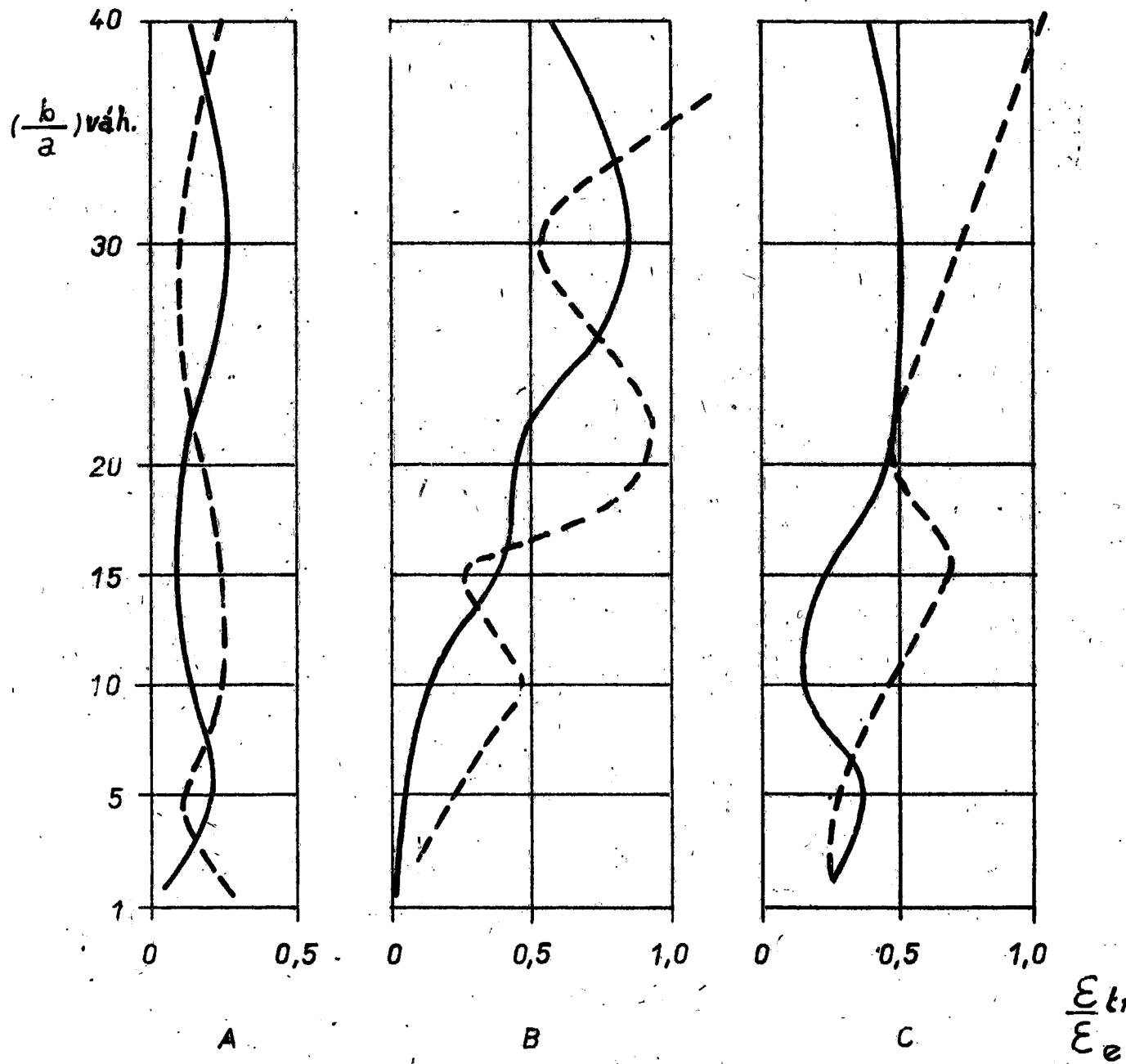
PBR. 14  
MATERIALY



OBR. 15



OBR. 16



Institut pro výchovu vedoucích pracovníků chemického průmyslu  
Podolská 16, Praha 4.

S O U T Ě Ž M A T E R I Á L U

Ing. Richard Bareš, CSc.

Ústav teoretické a aplikované mechaniky ČSAV, Praha 2, Vyšehradská  
č.49.

Katedra specialistů, Praha 1971.

Inženýr, který vybírá materiál ke splnění požadavků svého projektu, má nesporně větší zájem na jeho vlastnostech než na jeho složení. V dnešní době se pro každý účel snadno najdou nejméně dva a v některých případech 3 nebo 4 zcela odlišné druhy materiálů. Řadu důkazů o tom podali projektanti v takových odvětvích, kde není rozhodující cena, jako např. průmysl elektronický nebo kosmický. Tento trend však získává ekonomický význam v posledních desíti letech i v jiných odvětvích, kdy výrobci základních materiálů jeden po druhém rozvinuli do krajnosti své kapacity i sortiment. Nyní výrobci vyzdvihují přednosti kovů, keramiky, skla, plastických hmot, pryže, betonu atd., každý se snaží ubránit své tradiční trhy před náporem ostatních a navíc získat i trhy druhých. Vzniká zde komplex nových a složitých otázek obchodně - ekonomických, zasahujících i do státních (společenských) zájmů a dotýkajících se surovinové základny. Jednoduché srovnání ceny za kg oceli, hliníku nebo plastické hmoty říká jen málo o jejich skutečném relativním, konkurenčním umístění. Ekonomové musí brát do úvahy i konečné výrobní technologie. Ukazuje se tak, že použitelný index konkurenčnosti materiálu je cena za jednotku žádané vlastnosti. Cena v této formulaci je tedy dána součtem ceny materiálu, ceny práce a energie na zhodnocení konečného výrobku a případně společenského zhodnocení (nebo znehodnocení).

Vlastnosti, které určují užití většiny materiálů jsou např. pevnost a tuhost, zaplnění prostoru a kvalita a trvanlivost povrchu. Z těchto vlastností nejdůležitější, zdá se, zůstává pevnost; index konkurenčnosti může ve většině případů být vyjádřen proto jako cena za jednotku pevnosti. Existují ovšem aplikace, kde může mít neobyčejnou důležitost vysoká elektrická vodivost nebo extrémní tuhost, nebo vysoká odolnost korosi. Tyto případy jsou obvykle spíše vyjímkou, jedině měď ve více než v polovině případů je užita pro svou vysokou vodivost.

Státní hospodářské úvahy počítají (nebo by měly počítat) cenu materiálů ve třech stídiích jejich cesty na trh. první stadium plyně z původu : cena rud v dolech (která může zahrnovat poplatek za prospěšnost a musí zahrnovat poplatek za devestaci krajiny) nebo cena dřeva v lese (která musí zahrnovat cenu zalesňování a klimatického ovlivnění). Druhé stadium je přeměna základního materiálu (suroviny) v polotovar, do vyčistěné nebo koncentrované formy, např. kov do housek nebo ingotů. Konečně ve třetím stadiu je cena materiálu ve tvaru, ve kterém je dodáván výrobci konečného výrobku, např. u kovů desky, tabule, válcované profily. V každém stadiu je cena ovlivňována energií, potřebnou k přeměně nebo výrobě, prací, prodejnými, administrativními a jinými (režijními) náklady; všechny dohromady by měly vytvářet konečnou cenu. Důležitá je také možnost využití materiálu zbylého při výrobě nebo po skončení používání výrobku: tak např. lze snížit cenu kovového materiálu o cenu šrotu (zmenšenou o náklady potřebné ke zpracování šrotu). Plasty, protože většinou vznikají z monomeru současně s operací, kterou vzniká konečný výrobek, mají malé množství odpadu

a jen málokterý lze rentabilně znovu využít. Při kácení stromů a zpracování dřeva vzniká odpad v obrovském množství; je však využitelný nejen pro vedlejší výrobky, jako dřevovláknité a dřevotřískové druhy, ale i pro těžení chemických látek v něm obsažených ( např. pentosany ). Využitelnost tohoto dřevního odpadu je však omezena transportní cenou. Cement a beton mají nejjednodušší výrobní cyklus: vypálení věpence, bohatého na kysličník křemičitý, hlinitý a železitý, rozemletí slínku s malým množstvím sádrovce, pak smíšení cementu s vodou, štěrkem a pískem, obyčejně na stavništi a zaplnění formy, do které je vložena ocelová výztuž. Na konci své služby má beton jen malou nebo žádnou hodnotu. V minulosti výrobce jednoho z těchto druhů materiálů mohl účinnost své výroby a svou ekonomii měřit pouze porovnáváním s jinými výrobky stejného druhu. Nyní musí pracovat v neustálém střetu se zcela různými materiály. Např. pro výrobce oceli je nezbytné znát, jaká je cena hliníku. Jakékoli snížení ceny hliníku jej rázem učiní vážnějším konkurentem oceli. Ceny kovů v čistém stavu (polotovaru) jsou poměrně rozdílné ( v důsledku obtížnosti zpracování a ceny rudy ), avšak v následující fázi se sbližují, protože ceny dalších operací jsou přibližně stejně náročné. Proto určující faktor pro rozšíření relativně nových kovů, jako hliníku, magnesia, berylia, titanu a dalších je cena jejich polotovaru.

Obecný cenový trend pro většinu materiálu je stoupající.

V USA a západní Evropě je vzestup asi stejný jako celková ekonomická inflace.<sup>+</sup> Viditelnou vyjímkou z tohoto pravidla tvoří ceny plastických hmot: stále klesají a úměrně tomu se plastické hmoty stávají stále více konkurenční jiným materiálům.

Statistiky výroby rozdělují materiály do dvou tříd. Starší materiály ukazují ( např. v USA) malé zvětšování objemu výroby, zatímco hliník s plastické hmoty stoupají prudce od nízké úrovně výroby k nynějším 10% a 10 - 15% celkového objemu materiálů za rok. Stejné trendy, se zpožděním 2 - 5 let, prokazují statistikové záp. Evropy. V USA se vyrábilo v roce 1962 cca 5 mil. tun plastických hmot, což se mohlo zdát zanedbatelné ve srovnání s výrobou oceli (100 mil tun). Vezme-li se však v úvahu nízká objemová váha plastických hmot, ukáže se po vyjádření např. v kubických metrech, že plastické hmoty dnes již dosahují v USA objemu stejného řádu jako ocel. Ještě větší než ocel, a s ohromným rozdílem, je výroba betonu. Tonáž betonu může být získána násobením výroby cementu šesti; podle objemu je násobitel cca 8.

Spomalení růstu výroby starších kovů je nepochybně ovlivněno konkurencí hliníku a plastických hmot, ale také lepším využitím kovů v důsledku zlepšení jejich vlastností i zlepšení návrhu a výrobní technologie. Tak např. pro výrobu elektrického proudu, která se zvětšuje nyní v USA o 8 - 10% ročně, došlo tam během posledních 10 let ke zmenšení množství užité mědi v generátorech z 90 kg/megawatt na 25 kg/megawatt. Jiný příklad je konstrukce letadel, kde zvětšení rychlosti a únosnosti bylo příčinou zmenšení spotřeby kovů z 2,2kg/km/ cestující u Boeing Stratocrusier na 0,87 kg/km/ cestující u Boeing 707. K poněkud méně okázalému zvětšení účinnosti návrhu s následnou redukcí požadavků na kovy došlo i v jiných odvětvích, např. v automobilovém

+ ) Srovnatelné údaje z ČSSR a jiných socialistických států nejsou autorovi známy a v důsledku neexistence tržního hospodářství v těchto zemích by samy stejně podávaly jen zkreslenou informaci .

vém průmyslu, ve stavbě konstrukcí budov a mostů.

Z podrobných rozborů provedených v USA vyplynulo, že průmyslově vyspělé země dosáhly pravděpodobně významného kritického bodu; jejich spotřeba kovů na hlavu dosáhla vrcholu a je nyní na sestupu. To ovšem neznamená, že růst produkce kovů se zastavil nebo brzo zastaví ve světě jako celku. Dvě třetiny světové populace nedosáhly ještě zdaleka této spotřeby kovů na hlavu v USA.

Zpomalení uvedeného poklesu produkce kovů ve vyspělých státech bylo by možno zřejmě dosáhnout odstraněním téměř již axiomu o obecné nadřazenosti vlastnosti svářkové oceli nad stejnými vlastnostmi odlévaných kovů. V minulých se však technologie zlepšovala daleko rychleji ve slévárnách než ve válcovnách a kovárnách. Dosáhlo se velkých úspěchů v odstranění nepřesnosti a nejisté reprodukovatelnosti ve výrobě forem a ve zlepšení povrchu a mechanických vlastností odliatku. Svářková ocel je sice ještě levnější než litá, avšak výrobky z neželezných kovů jsou již levnější lité než vyrobené z těchto kovů ve svářkovém stavu. Vzhledem k tomu, že pro výrobu ze svářkové oceli (válcování, lisování) je třeba velké množství energie, jejíž cena kontinuálně stoupá, zdá se, že ceny energie se stanou rozhodujícím a limitujícím faktorem dalšího snížování ceny výrobků ze svářkové oceli. Zřejmě v budoucnu může jisté zlevnění být dosaženo pouze gigantismem, tj. válcováním širokých desek a plechů nebo kováním velikých kusů z velikých výchozích ingotů. Velice perspektivní je právě se rovíjející kontinuální lití, užité již pro malé příčné průřezy oceli i hliníku. Výhodou je kromě redukce energetických příkonů i menší stavební i strojní investice, nezávislost na okolí

( jako u kováren ) a velká produktivita.

V oblasti stavebních konstrukcí se odehrává v současnosti válka mezi ocelí a betonem; její výsledky se mění od země k zemi. Zdá se, že rozhodne-li se pro jeden nebo pro druhý závisí méně na kvalitách těchto dvou materiálů než na důmyslnosti a prestiži architektů a inženýrů. Posuzujíc podle USA zdá se, že ocel vyhřívá ve vertikálních konstrukcích, zatímco beton v horizontálních s výjimkou velmi velkých mostů. V některých zemích (např. Anglie) je konkurence oceli značně znevýhodněna, když se nebude zřetel na dosažené zlepšení kvality oceli a ne-povoluje se použití větších dovolených namáhání. V jiných zemích je státem regulovaná cena oceli (např. prostřednictvím daní) jako důsledek surovinové závislosti. Faktem je, že v posledních letech došlo ke zvětšení výroby železobetonu o 60%. Na základě ceny za jednotku pevnosti jsou oba materiály rovnoměrné. U betonu odpadá antikorosní a protipožární ochrana, nezbytná u oceli. Výsledkem je, že např. v USA mohou být postaveny mnohoposchoďové domy z betonu za cenu o 25 - 35 % nižší než z oceli.

V menší míře ztrácí další trhy ocel pro hliník. V USA je sice výroba hliníku pouze 5% váhy oceli, avšak toto množství představuje 15% objemově. A asi 50% tohoto množství je aplikováno na úkor oceli. Cena za jednotku pevnosti sice mluví jasně pro ocel ( 4x - 3x nižší ), avšak aplikací dalších kriterií (lehkost, tuhost, větší odolnost korosi ) se ekonomické hodnocení změní. Aby výrobci oceli neztratili další trhy, vybudovali nové rozsáhlé laboratoře pro výzkum železných kovů. To přineslo úspěch např. v zavedení nové technologie při výrobě plechů vál-

covaných pro konservy, kterou se dosáhlo zmenšení tloušťky plechu o 2/3 původní. Nyní se usilovně pracuje na eliminaci drahého cínu a cínování z výrobního procesu. U stavebních konstrukcí se v současnosti upouští od prvků z hliníkových slitin, zaváděných před 10 - 20 lety a znova se téměř výhradně přechází k ocelovým a železobetonovým. Naprotitomu pro obvodové stěnové panely budov se přechází stále více k hliníkovým slitinám; takové panely jsou lehké, vzhledné, povrchově stálé, různě barevné (trvale) a tím po všech stránkách lepší než i z nerezavějící oceli a také levnější. Při stavbě lodí se redukuje váha horních částí důsledným používáním hliníkových slitin dnes již téměř všeobecně; tím se redukuje podstatně i váha kovu na tunokm vezeného nákladu. Hliník ovšem vytlačuje i měď; o co je hliník horší v elektrické vodivosti, o to je levnější a lehčí a také surovinově dostupnější.

V každé z těchto míst se kovy setkávají s konkurencí plastických hmot. Pro objektivní posouzení konkurence je velmi těžká situace, neboť žádný katalog cen a vlastností plastických hmot neukazuje zcela jasně, jaké jsou jejich výhody. Podle ceny za jednotku pevnosti i nejlevnější z těchto materiálů - PVC a skelný laminát - vykazují relativně vysoké hodnoty 10 až 80 x větší než ocel. Polyethylen, který se nyní rychle dostává na prvé místo mezi plastickými hmotami, stojí rovněž 10x více než ocel za jednotkovou pevnost. Příčina, proč se produkuje nyní tak obrovský objem plastických hmot je v tom, že se neposuzují podle těchto (nebo pouze podle těchto) kritérií. Jejich přitažlivost tkví v klesající ceně, nízké objemové váze, jednoduchosti opracování a širokém rozsahu tvrdosti

a měkkosti, tuhosti a ohebnosti, barvy, transparentnosti a nepřehlednosti, ve kterých mohou být snadno vytvořeny.

Není překvapivé, že plastické hmoty zcela dominovaly v hračkách a obalovém průmyslu. Avšak plastické hmoty jako PVC a polyethylen nahrazují již i velké množství mědi, olova, zinku, cínu, oceli a litiny pro domácí, komunální a průmyslové potrubí. Sklem plněný nylon plně nahrazuje zinek, magnesium nebo hliník. Malé čluny se dělají téměř výhradně ze skelných laminátů.

Tyto aplikace jsou zárodkem dalšího vývoje. U kovů jsou dnes již dobře známy veškeré vlastnosti i omezení, a nebyl vynechán výzkum žádných nových významných kovů, takže lze těžko očekávat větší překvapení. V plastických hmotách jsou syntetizovány nové molekuly, polymerovány do řetězců nového uspořádání a agregovány do struktur s novými kombinacemi vlastností a existuje proto stále možnost revoluce "přes noc". Jakmile např. budou vyvinuty plastické hmoty s vhodnými mechanickými vlastnostmi při  $150^{\circ}\text{C}$ , může to zcela změnit konkurenční situaci na tak ohromném trhu, jako jsou automobily a stavební konstrukce. Můžeme směle říci, že jsme dnes svědky největšího vývoje v technologii a ekonomii materiálů v dějinách člověka.

Obr. 1. - Srovnání výroby šesti hlavních materiálů v USA podle váhy.

Obr. 2. - Vzájemné relace křivek se změní zavedením kubických metrů namísto kp; toto srovnání je správnější pro nové materiály s malou objemovou váhou.

Obr. 3. - Celková produkce plastických hmot v posledních 10 letech v USA ukazuje stálý vzestup. V roce 1968 již objem vyrobených plastických hmot předstihl objem vyrobené oceli. Podle statistik v roce 1970 byl ~~sazname-~~ nán proti roku 1969 pokles výroby většiny odvětví; proti tomu došlo ke zvětšení o 8,4% ve spotřebě plastických hmot. Celkový národní produkt USA činil v roce 1969 727,1 miliardy dolarů, v roce 1970 jen 725,7 miliardy dolarů; spotřeba plastických hmot se ale zvýšila ze 7,7 miliardy kg v roce 1969 na 8,4 miliardy kg v roce 1970.

Obr. 4. - Produkce bavlny, vlny a chemických vláken ve světě v % .

Tab.1.

Skladba hlavních druhů plastických hmot vyráběných v USA v r.  
1970.

Materiál	Výroba v milionech kg
alkydy	273
celulozy	81
kumaron-indenové pryskyřice	154
epoxidové pryskyřice	75
fenolické pryskyřice	488
polyesterové pryskyřice	292
polyethylen, vysokomolekulární	770
polyethylen, nízkomolekulární	1 950
polypyropylén	458
polystyrén a styrénové kopolymery	1 510
polyvinylchlorid a kopolymery	1 430
všechny ostatní vinyly	294
močovinové a melaminové hmoty	322
různé (acetalové, akrylové, prysk., fluoroplasty, nylon, fenoxidy, polykarbonáty, silikony, uretanové pěny a další )	780
Celkem	8 880

Skladba hlavních druhů plastických hmot používaných ve stavebnictví v USA v roce 1970.

Materiál	Výroby v milionech kg		
	1969	1970	1971
<u>dekorativní lamináty</u>			
fenolické	43	41	45
močovinové a melaminové	24	21	25
jiné	4	5	6
<u>podlahoviny</u>			
kumeron-indenové	16	15	14
epoxidové	5	5	5,5
PVC	151	159	181
<u>zašklení</u>			
akrylátové	8	9	10
skelné lamináty	5	6	7
polykarbonátové	1,3	1,8	2,7
<u>izolace</u>			
fenolické (pojivo)	56	54	61
polystyren (pěna)	43	47	54
polyuretan (pěna)	28	37	54
<u>osvětlovadla</u>			
akrylátové	20	21	23
celulosová	2,2	2,2	2,2
polykarbonátové	0,4	0,4	0,9
polystyrenové	17	17	18
PVC	4	4	5
další	4	4	5
<u>příčky a stěny</u>			
akrylátové	4	5	5
butyrátové	1,3	1,3	1,3
skelný laminát	37	40	50
polystyren	4	4	4
PVC	22	27	32

Tabulka 2 - pokračování

Materiál	Výroba v milionech kg		
	1969	1970	1971
<u>trubky, fitinky a armatura</u>			
ABS	32	38	48
<u>polyethylen, nízkomolekul.</u>	29	29	32
<u>polyethylen, vysokomol.</u>	41	41	45
<u>polypropylen</u>	8	8	9
<u>polystyren</u>	23	27	32
PVC	131	172	220
<u>lisované profily (např.</u>			
<u>okna, okapy, žlaby a pod. )</u>			
PVC	19	23	29
<u>polyethylen</u>	2	2	3
<u>koupelny a příslušenství</u>			
<u>koupelen</u>			
<u>acetalové hmoty</u>	1,3	1,8	2,2
<u>akrylové hmoty</u>	3	3	4
<u>polystyrenové hmoty</u>	3	3	3
<u>skelné lamináty (vany,</u>			
<u>sprchové kouty</u>	13	17	23
<u>pryskyřicí pojené dřevné</u>			
<u>hmoty</u>			
<u>fenolové pryskyřice</u>	110	113	124
<u>močovinové a melaminové</u>	179	183	204
<u>izolace proti páře</u>			
<u>polyethylen</u>	36	40	48
PVS	4	5	8
<u>interierové stěnové obklady a povrchy</u>			
<u>polystyren</u>	4	3	2
PVC	32	36	41
<u>jiné</u>	1,3	1,3	1,3

Cena materiálu v Britanii jednak podle váhy, jednak podle objemu a konečně podle pevnosti. Přestože cena některých nových materiálů za tunu je daleko větší než starších, jejich cena za jednotku pevnosti je daleko vyrovnanější.

	Tahová pevnost kg/cm <sup>2</sup>	Obj. váha kg/m <sup>3</sup>	Cena liber/t	Cena liber/m <sup>3</sup> . 10 <sup>2</sup>	Cena liber/t/kg/cm <sup>2</sup> . 10 <sup>2</sup>
<u>Litina</u>					
šedá	1600 - 2200	7 300	70-120	0,7-1,6	4,4 - 5,5
vysoce kvalitní	2200 - 3800	7 300	90-150	1,2-2,1	4,5 - 5,9
<u>Svářková ocel</u>					
konstrukční	5800 - 6800	7 800	80-100	1,0-1,3	1,7 - 1,5
plechy	3900	7 800	40- 58	0,51-0,74	1,0 - 1,5
lisovaná a kovaná	5500 - 7100	7 800	140-200	1,8 -2,6	2,5 -2,8
svařovací elek- trody	3900	7 800	260-800	3,3 -10,2	6,7 -21,0
<u>Hliníkové od- litky</u>	1400 - 1700	2 700	300-480	11,1 -17,8	21,0 -28,0
lité do písku					
slitina LM 24	2500	2 700	270-320	10,0 -11,9	11,0 -13,0
pod tlakem					
<u>Svářkový hliník</u>					
protlačovaný	1900 - 2800	2 700	355-390	13,1 -14,5	19,0 -14,0
plechy	2000 - 3000	2 700	260-600	9,6 -22,2	13,0 -20,0
svařovací elektrody	2700	2 700	800-1200	20,6 -44,4	30,0 -45,0
<u>Polyethylen</u> (lisovaný)	160	900	260	29	163,0
<u>PVC (trubky)</u>	630	1 400	200	14,3	32,0
<u>Skelné lamináty</u>					
se skelnou rohoží	1600-1900	1 400	360	25,7	22,5-19,0
se skelnou tkaninou(lisov.)	4000-11000	1,870	3000	160,0	75,0-27,0
epoxidový se skel. tk.(lis.)	5000	1,870	4000	340,0	80,0

Tabulka 4.

Pro tři kovy je ukázána změna ceny v dolarech za 1 t od základního materiálu ke konečnému výrobku  
(ceny měděných rud a polotovarů nejsou udány, protože nejsou volné na trhu )

	ocel	hliník	měď
ruda surová	,9,39	7,15	
ruda zušlechtěná	12,46	58,0	
housky			
polotovary	56,07		
základní materiál			
(ingoty, cágly, pruty )	85,-	500,-	748,-
plechy	131,34	810,-	1 410,-
konstrukční	129,36	760,-	1 415,-
dráty	213,56	640,-	1 030,-

Tabulka 5.

Je ukázána změna spotřeby materiálu s vývojem nových technologií při stavbě letadel; zmenšení váhy v relaci na jednotku (cestující . km ) letu je markantní.

Rok	Typ letadla	zákl. data	kg/hod/cestující.km
1930	HANDLEY PAGE 42	13 300 kg 150 km/hod. 39 cest.	2,27
1940	EMPIRE FLYING BOAT	21 700 kg 230 km/hod. 30 cest.	3,14
1950	BOEING STRATO - CRUISER	66 000 kg 500 km/hod. 60 cest.	2,20
1960	BOEING 707	141 000 kg 970 km/hod. 173 cest.	0,84
1963	SUPER VC10	146 000 kg 1 000 km/hod. 180 cest.	0,81
1970	CONCORDE	132 000 kg 2 300 km/hod. 160 cest.	0,36

Tabulka 6.

Také v SSSR se rychle výroba plastických hmot zvětšuje: v roce 1967 bylo vyrobeno 1 114 tisíc tun, v roce 1968 1 293 tisíc tun, a v roce 1970 již 1 800 tisíc tun. Rozbory ukazují velké rezervy ve využívání plastických hmot proti dnešní skutečnosti. Porovnání vyplývá z tabulky v kg plastických hmot na 1 stroj.

Skutečný stav	Možnosti podle technicko-ekonomických úvah
obráběcí stroje , osobní automobily	6 - 8                    30 - 40
rypadla	2 - 5                    až 100
motorové lokomotivy	80 - 90                1 500 - 1 700
osobní vagony	1 000 - 1 200            3 500
vodní turbiny	60 - 70                5 000 - 6000

Tabulka 7.

Spotřeba plastických hmot na 1 automobil v Británii a USA (v kg)  
rovněž stále vzrůstá a očekává se další růst podle tabulky :

Roky	Británie	USA
1962	6	
1963	10	
1964	13	
1965	16	14
1966		17
1967		26
1968		37
1969		41
1970		44
1975	55	53

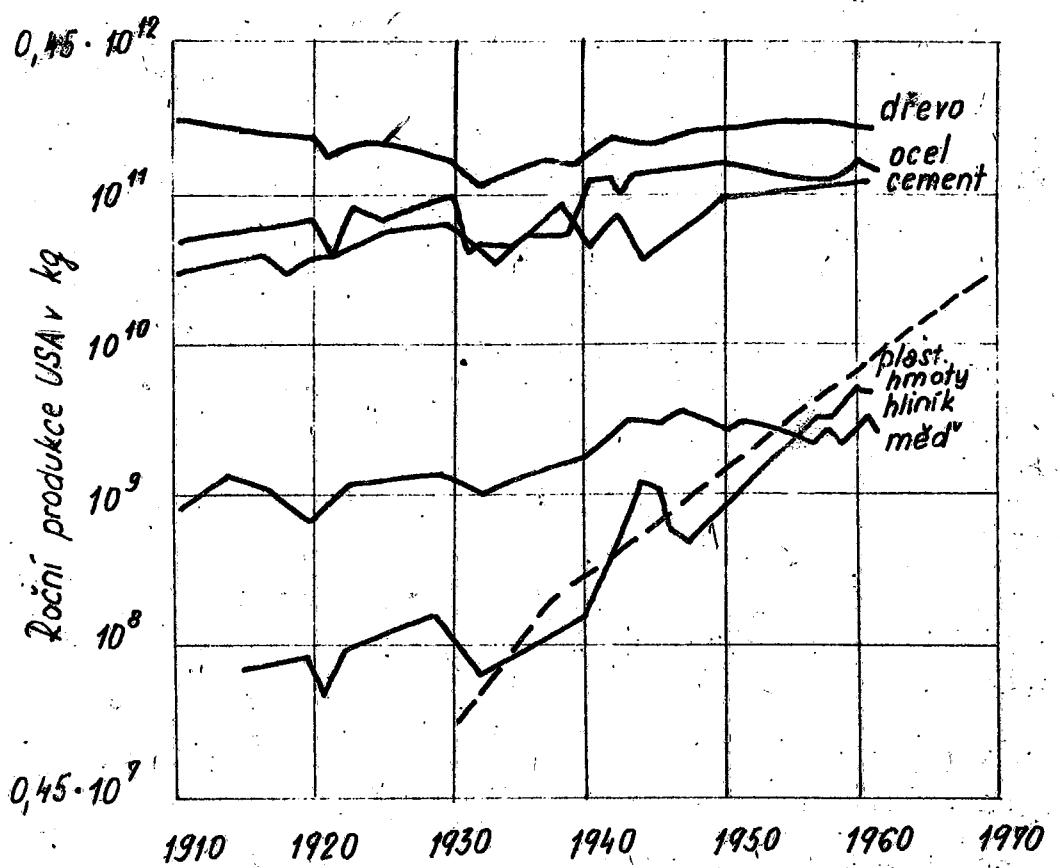
Tabulka 8.

Výroba chameckých vláken v ČSSR v letech 1960, 1965, 1969, 1970 a plánovaná kapacita v roce 1975 a 1980 udává v 1 000 t další seastava.

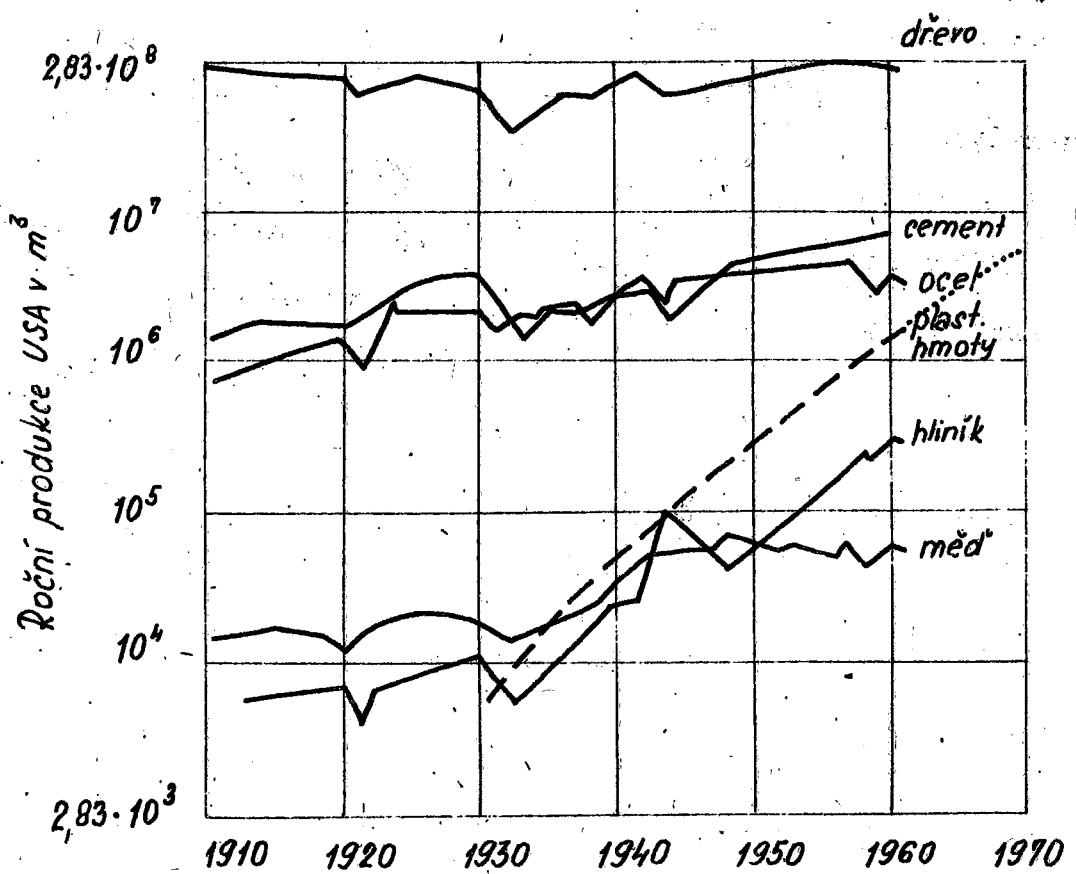
Celkové množství synt. vláken vyrobených ve světě bylo v roce 1969 přes 8 mil. tun, v roce 1980 se předpokládá 17,1 mil. tun.

Druh vláken	1960	1965	1969	1970	1975	1980
viskozové vl.	58,8	69,3	69,9	69,6	101,5	111,2
polyamidové vl.	3,0	8,3	21,9	22,1	32,1	35,6
polyesterové vl.	0,4	1,4	16,8	13,8	33,0	43,3
polypropylenové vl.	-	-	1,2	6,7	18,9	29,9
Chemická vlákna celkem	62,2	79,0	96,8	112,2	185,5	220,0

ČSSR se tedy podílí na světové výrobě syntetických vláken v roce 1969 asi 1,21 %, v roce 1980 se předpokládá podíl asi 1,29 %. Celková produkce plastických hmot na hlavu je v ČSSR cca 13 kg, zatímco v USA činí přes 40 kg a v NSR dokonce přes 50 kg.

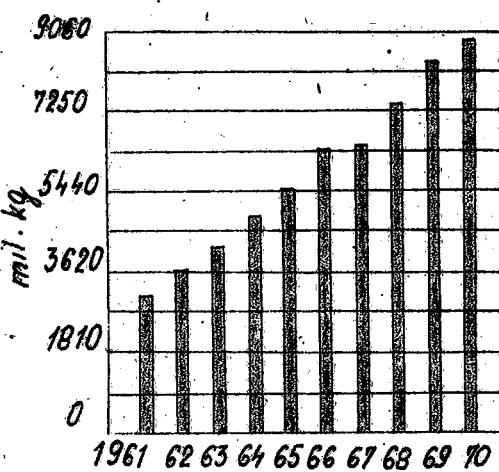


DBR. 1

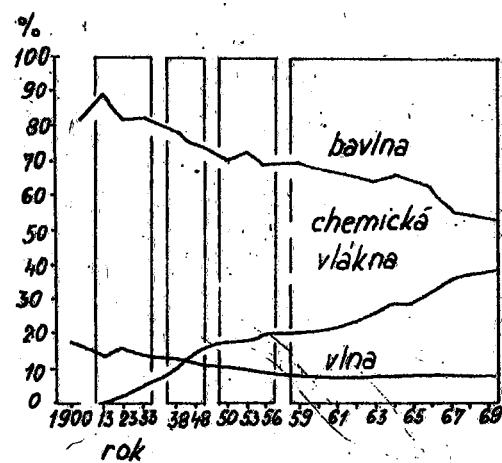


DBR. 2

SOUTĚŽ



OBR. 3  
SOUTĚŽ



OBR. 4  
SOUTĚŽ

Institut pro výchovu vedoucích pracovníků chemického průmyslu  
Podolská 16, Praha 4.

**PLAST BETONY**

Ing.Richard Bareš,CSc

Ústav teoretické a aplikované mechaniky ČSAV, Praha 2, Vyšehradská  
č.49.

Katedra specialistů, Praha 1971.

## 1. Úvod

Aplikace plastických hmot ve stavebnictví se rok od roku zvyšuje. Od počátku tohoto desetiletí, kdy jsme upozornili na možnost využití plastických hmot uvláště termosetických jako pojiva betonu, počly se postupně rozšiřovat více či méně za svěcené a následkem toho i více či méně úspěšné pokusy tohoto druhu v praxi. Počáteční silný odpor zastánců tradičních technik slábl, až někteří z počátečních odpůrců sami se počli zabývat těmito nebo podobnými novými technikami.

Vedle řady úspěšných staveb, provedených některými našimi podniky, vedle řady odborníků, kteří vyrostli ve zkušené specialisty nového oboru, objevila se i řada staveb neúspěšných, do konce havarijních, většinou jako důsledek povrchních znalostí zvláštností nového materiálu, nedostatečného odborného vedení, nedostatečně vyškolených specialistů.

Spolu s utříděním zmatené terminologie, v níž slovo plastbeton začíná být používáno jako módní pro všechno, má něco společného s plněnou plastickou hmotou, vyžadují zmíněné neúspěchy seznámit odbornou veřejnost s hlavními zásadami správné technologie a vlastnostmi plastbetonu. Můžeme říci, že po výzkumu, probíhajícím v ÚTAM-ČSAV i na jiných pracovištích u nás i v cizině neexistují žádné objektivní důvody, znemožňující úspěšné použití plastbetonů a všechny okolnosti ovlivňující výsledné

vlastnosti máme plně v rukou.

V předloženém statí bude proto nejprve ujasněna terminologie, budou zopakovány hlavní zásady správné výroby a aplikace plastbetonu, uvedeny jejich hlavní mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti.

## 2. Terminologie

Plasticke hmoty se používají jednak k ovlivnění vlastností již známých materiálů, jednak k vytváření materiálů zcela nových.

Jestliže se používá plasticke hmoty jako přísady do cementového betonu k ovlivnění některých vlastností /zvětšení pevnosti v tahu, snížení obrusnosti a prašnosti, zvýšení chemické odolnosti a nepropustnosti atd.-, mluvíme o polymer-betonu / cement-resin concrete nebo polymer cement concrete, beton de ciment-résine, Cement-Kunststoff-Betone nebo Betone mit Polymerzusätzen, polymerbeton/. Plasticke hmota se přitom může vnášet do cementového betonu v různých fázích jeho výroby: jako přísada do zámesové vody, jako pevná nebo tekutá přísada do čerstvé směsi, jako penetrační roztok do zatvrdlého betonu.

Jestliže plasticke hmota tvoří hlavní, jedinou složku pojiva materiálu složeného z inertní sypké směsi (štěrkopísku, keramitu a pod.) pak mluvíme o plastbetonu (resin-concrete, beton de plastique, Kunststoff-Betone, plastobeton).

Ani jeden ani druhý název nevystihují správně charakter obou materiálů, u odborné veřejnosti a v literatuře se však již nátolik vžily, že nemá smysl nyní zavádět označení nová,

správnější.

Plastické hmoty, míšené / plněné / s jinými, většinou interními a jemnozrnými materiály za účelem změny některých vlastností / zmenšení smerštění, zvýšení pevnosti a pod./ se nazývají proti tomu prostě plněné plastické hmoty.

Je třeba ještě definovat rozdíl mezi plastbetonem / nebo plastmaltou / a plněnou plastickou hmotou. Kromě již zmíněné velikosti zrn je hlavním kriteriem, že-li vytvořen v materiálu skelet pevných součástí / plniva / či jsou-li pevné součásti pouze dispergovány v pojivu / matrix /. V případě, že plnivo je dispergováno v pojivu, mluvíme o plněném pojivu (plněné plastické hmotě) , v případě, že je vytvořen souvislý skelet plniva, mluvíme o p o j e n ě m p l n i v u / plastbetonu, plastmaltě/. Mezi mezi oběma případy je závislá na řadě činitelů: na mezerovitosti plniva, na jeho specifickém povrchu / tedy i na velikosti zrn/, na způsobu a intenzitě zpracování atd.

### 3. Technologie plastbetonů <sup>x/</sup>

Plastbetony se skládají z plniva, obyčejně ze štěrkopísku, o velikosti zrn 0 - 3 - 10 cm / v závislosti na nejmenším rozmeru konstrukce podle podobných pravidel jako u betonu / a pojiva - monomeru / nebo částečného polymeru / pryskyřice, tužidla, urychlovače, případně jiných přísad / ředidla, iniciátoru a pod./. Směsi se zaplňují formy, kde se zpracovává / pěchuje, střásá a pod./ a ponechá se v klidu v suchém a teplém prostředí do ztvrdnutí pryskyřice. Dobu ztvrdnutí plastbetonů lze obvykle regulovat v širokých mezích / od několika hodin do měsíců /.

Optimální množství pojiva u plastbetonů je nižší než u cementských betonů / této i dalších kapitolách jsou uváděny výhradně poznatky, získané autorem V ÚTAM-ČSAV.

mentového betonu a pohybuje se podle mezerovitosti plniva, jeho povrchu a zpracování v mezích od 1/8 do 1/12 váhy ostatních inertních složek. Není-li třeba zachovat nepropustnost, lze množství pojiva dále snížit až na 1/20 - 1/30 váhy inertních součástí. Zcela mylné je domnívat se, že zvětšením množství pojiva / tzv. omaštěním / se zlepší vlastnosti plastbetonu anebo zajistí úspěch i tehdy, nejsou-li splněny jiné technologické požadavky / zpracování, ošetření /. Obvykle se dosáhne pravého opaku. V některých případech je dokonce žádoucí, aby plastbeton, nebo plastmalta byla propustná: např. ochranné vrstvy nebo horizontální značky na betonových vozovkách musí kromě jiných vlastností, vykazovat alespoň stejnou propustnost jako vlastní beton, aby nedocházelo pod nimi ke kondenzaci zemní vlhkosti se vsemi známými rušivými vlivy. Rovněž dávkování tužidel, urychlovačů, iniciátorů je třeba dodržovat přísně v jistých mezích, nelišících se příliš od mezí udaných výrobcem pro samotnou pryskyřici. Přídavek každého ředidla znamená vždy zhoršení vlastností výsledného materiálu, i když se zdá, že ředidlem dosažené zlepšení zpracovatelnosti by mohlo být pro výsledek příznivé. Výjimku tvorí jen ředidla, která se zavazují do struktury pojiva a stávají se tak jeho trvalou součástí / např. styren v polyesterové pryskyřici /.

### 3.1 Plnivo

Plnivo musí mít, kromě obvyklých vlastností plniva cementového betonu ještě řadu dalších vlastností. Tak především musí být plnivo chemicky odolné nejen proto, že se používá plastbetonů v silných agresivních prostředcích, ale i proto, že tužidlo je obvykle poměrně silné korosivní činidlo / kyselina nebo alkalie /. Dále musí být jeho reakce neutrální nebo shodná s

druhem použitého tužidla. Dalším důležitým požadavkem je minimální vlhkost plniva / 0,2% váhy plniva/. U všech zatím používaných plastbetonů je každé vnesení vlhkosti do materiálu před jeho úplným vytvrzením škodlivé. Vliv vlhkosti plniva u furol-furalového plastbetonu ukazuje obr.1 .  
vzhledem

Pevnost a houževnatost plniva má být k pevnosti pojiva dostatečná. U plastbetonů je možno dosáhnout vcelku vyrovnaní pevnosti obou účastníků / plniva a pojiva /, nikoliv však je jich stejné stlačitelnosti. Pojivo má vždy podstatně (řádově) menší modul pružnosti než štěrkopisek; tím nastává nestejnomořné rozdělování napětí soustředováním do míst méně stlačitelných / s větším modulem pružnosti / a vznikají příčné tavy. Příznivě se zde přitom uplatní jednak zvýšená pevnost v tahu pojiva / proti cementovému kameni / jednak jeho zvýšené dotvarování / nebo relaxace /, které poměrně rychle umožní účelnou redistribuci napětí. Tyto okolnosti se příznivě uplatní i při přenášení a redistribuci napětí od smrštování.

Pro velikost, tvar a poměrné zastoupení zrn platí stejné zásady jako pro cementový beton; pouze je třeba pamatovat na dodání i nejjemnějších složek / místo cementu / do soustavy. Vhodná je moučka / mikroplnivo / se zrny 2 - 200 mikronů/inertní plniva jako křemenná moučka, grafit, koksová moučka a pod./.

### 3.2 Pojivo

Pojivo je zvořeno makromolekulární hmotou, která postupně, po přidání tužidla příp. dalších příslad, tvrdne jako důsledek polykondensační nebo polymerační reakce. Pro pojivo plastbetonu jsou zatím nejhodnější termosety, z nichž především ty, které mají na jedné straně výborné mechanické i chemické vlastnosti.

nosti, lze s nimi pracovat za normálních nebo jen mírně zvýšených teplot a na druhé straně jsou v dostatečném množství a za dostupnou cenu. Z pryskyřic u nás vyráběných jsou z těchto hledisek vhodné furol-furalové <sup>x/</sup> epoxydové a polyestrové pryskyřice. Fenol- nebo močovino-formaldehydové pryskyřice jsou pro tento účel nevhodné.

### 3.3. Poměr míšení

Poměry míšení jednotlivých složek jsou kromě zpracování a ošetření hlavní okolnosti, ovlivňující veškeré vlastnosti plastbetonů. Důležité je, aby mezerovitost štěrkopísku byla minimální při současně minimálním jeho specifickém povrchu. Toho se dosáhne skládáním z několika frakcí do směsi s přetržitou křivkou zrnitosti. Pro takto skládané směsi se sníží spotřeba pojiva potřebná k zajištění nepropustnosti i zpracovatelnosti. Z hlediska spracovatelnosti je výhodné, je-li jako mikroplniva /povrchově aktívnych látek / např.grafitu /.

Pro volbu množství pojiva je rozhodující hranice propustnosti, jež je ovšem závislá dále na mezerovitosti plniva a zpracování směsi. Tato hranice se pohybuje ve váhovém poměru pojiva k plnivu 1 : 8 - 1 : 12, což odpovídá cca 250 - 190 kg pojiva na 1  $m^3$  hotového plastbetonu.

### 3.4 Míšení, zpracování a ošetření

Míšení jednotlivých složek pojiva a plniva je důležité; je třeba zachovat nejen dostatečnou intensitu míšení / míchačky s nuceným pohybem /, ale i vhodný pořádek míšení jednotlivých komponent. Od dokonalého promíšení je ve značné míře závislá

x/ Plastbeton s furol-furalovým pojivem je běžně nazýván berol.

kvalita výsledného materiálu. Velmi důležité je, aby plastbeton byl úplně zpracován ještě před začátkem tuhnutí; jakákoli manipulace s ním během tuhnutí a tvrdnutí je silně škodlivá a má za následek porušení vnitřních vazeb s důsledkem nejenom snížení mechanických vlastností, ale zejména snížení nepropustnosti, chemické odolnosti a trvanlivosti.

Vlastnosti plastbetonu značně ovlivňuje způsob a intenzita jeho zpracování, pro které se používá technik běžných u cementového betonu. Vliv zhutnění dusáním na pevnost furolfuralového plastbetonu je patrný z obr.2. Ošetření plastbetonu je rovněž nutno věnovat dostatečnou péči: proti cementovému betonu je třeba se postarat o co nejsušší ( pod 50% RV ) a teplé prostředí do  $40^{\circ}\text{C}$ . Průběh tvrdnutí v normálním prostředí /vzhledem k dokonale vytvrzenému plastbetonu / ukazuje obr.3. Vlhkost prostředí při tvrdnutí má nepříznivý vliv na pevnost plastbetonu, jak dokumentuje např. obr.4 pro furol-furalový plastbeton. K úplnému vytvrzení dochází při teplotě  $35 - 40^{\circ}\text{C}$  během 3 dnů.

#### 4. Pevnost plastbetonů

Na obr.5 je zobrazen průběh konečných pevností různých plastbetonů v tlaku a v tahu za ohybu spolu s jejich objemovou vahou v závislosti na složení směsi. Je vidět, že jsou v podstatě rovnocenné všechny plastbetony z plnohodnotných pryskyřic pro poměr 1 : 10 a liší se jen málo pro směsi chudší pojivem. Rovnocennost všech plastbetonů z hlediska objemové váhy je nalézena v okolí váhového poměru pojiva k plnivu 1 : 18. Pevnost vytvrzených plastbetonů ovlivňují ovšem podmínky okolního prostředí, zvláště mají-li spojitou / otevřenou / póravitost,

jinými slovy jsou-li propustné. Zejména vlhkost prostředí ovlivňuje podstatně pevnost, jak ukazuje schematicky obr.6 pro furol-furalový plastbeton. Počínaje druhou oblastí jsou pevnosti zjištěné ve vlhkém a suchém prostředí odlišné více než o 100%. Úsečky obou extrémů jsou funkcí především hustoty zatvrdlého plastbetonu, nebo předpokládáme-li stejné zpracování, mezerovitosti plniva  $\mu$ . Minimum odpovídá nejhustejší směsi, maximum nejpříznivější vnitřní napjatosti. Jak se mění pevnost furol-furalového plastbetonu s teplotou ukazuje obr.7.

Srovnání pórovitosti různých plastbetonů /obr.8/ ukazuje, že objem pórů v nich se příliš neliší, že tedy nezáleží od druhu pojiva, ale je dán jinými faktory, jako mezerovitosti plniva, zpracováním atd.

Pevnost plastbetonů s časem / v laboratorních podmírkách/ se podstatně nemění, jak ukazuje např. pro furol-furalový plastbeton obr.9. Po několika měsících po malém počátečním snížení zůstává pevnost trvale konstantní. Tento plastbeton vytvářovaný za normálních podmínek dosahuje též pevnosti až po roce. Při dlouhodobém zatížení plastbetonů se jejich trvalá pevnost s časem snižuje a blíží se asi 50% krátkodobé pevnosti /obr.10/. Jinak ovšem vypadá situace při dlouhém zatížení ze zvýšených, příp. snížených teplot. Přestože použité pryskyřice jsou termosety, liší se podstatně tečení /creep/ plastbetonů z nich vyrobených při různých teplotách, jak dokumentuje např. obr.11.

## 5. Přetvárnost plastbetonů

Pro zdárné využití plastbetonů ve stavební praxi je nezbytná znalost jejich přetvárných charakteristik. Jednou z nich je modul pružnosti. Závisí především ( avšak nikoliv jednoduše ) na složení směsi. Typická závislost modulů pružnosti statických a dynamických ( při napětí  $\sigma = \mathcal{H}/3$  ) na složení jednotlivých plastbetonů je uvedena na obr.12. Ukázalo se, že pro různé plastbetony ( s plnohodnotným pojivem ) u směsi prakticky pro konstrukce použitelných ( tj. pro směsi mezi 1:5 a 1:15 ) je modul pružnosti ( stejně jako pevnost ) přibližně týž ( v okolí  $200\ 000 \text{kg/cm}^2$  ). Nejvyšší absolutní hodnoty dává polyesterový plastbeton (  $250\ 000 \text{ kg/cm}^2$  ):

Vliv objemového zastoupení obou pevných fází v soustavě ( složení směsi ) na tvar pracovního diagramu ( závislosti na napětí na přetvoření ) furol-furalového plastbetonu ukazuje obr. 13. Směsi 1 a 2, odpovídající prvé oblasti ( s nespojitou póravitostí ) jsou velmi výrazně odděleny od ostatních směsí ve třetí oblasti ( spojitě poresní ). Pozornost poutá vývoj objemového přetvoření  $\xi_v$ , vypočteného ze známého vztahu  $\xi_v = \xi_p + 2\xi_t$  pomocí změřených podélných  $\xi_p$  a příčných  $\xi_t$  přetvoření, a průběh Poissonova součinitele  $\nu$ , zajímavý je vzájemný vztah křivek pro jednotlivé směsi. Ukazuje se, že směs 2 se nachází již ve druhé → přechodové - oblasti, na jejímž počátku se napjatost a přetvoření soustavy utvářejí úplně jinak, než v obou krajních - prvé a třetí - oblastech. Při poměrném napětí  $\sigma = 0,6 - 0,7$  se zastavuje zmenšování objemu s tlakem, objem naopak počíná vzrůstat a před porušením se dokonce podstatně zvětší proti objemu původnímu.

Silně podobné závislosti, včetně anomálního chování směsi v okolí poměru pojiva k plnivu 1 : 5 byly získány i pro jiné plastbetony. Obr. 14, 15, 16 znázorňují poměrné delkové a objemové změny při namáhání až do porušení fenol-formaldehydového, epoxidového a polyesterového plastbetonu.

Jak se mění pracovní diagramy furol-furalového plastbetonu s teplotou ukazuje další např. obr. 17 ( pro směs 1 : 10.) Objemové přetvoření při všech teplotách je největší pro směsi bohaté pojivem, téměř u všech směsí i teplot se ukazuje již dříve popsáný jev: od jistého poměrného namáhání dochází ke zvětševání objemového přetvoření, přičemž u směsí bohatých pojivem a při vyšších teplotách je tento jev nejvýraznější. V těchto případech se dokonce objem tělesa zvětšuje nad původní objem. Tomu samozřejmě odpovídá i změna Poissonova součinitel: u směsí bohatých pojivem a při vyšších teplotách je jeho hodnota nejvyšší a nejvíce také roste s napětím. Pracovní diagramy mají přibližně stejný tvar u směsí 1 - 3 , tedy pro směsi v prvním nebo přechodném intervalu, t.j. pro oblasti nespojitě nebo jen částečně spojité pórovitosti. Nejmenší vliv má změna teploty na pracovní diagramy ( podle lineárního podélného přetvoření ) v prvním intervalu.

## 6. Mezní přetvoření

Důležitou veličinou jsou mezní přetvoření. K významné změně směrnice v závislosti mezního přetvoření na složení směsi dochází u všech plastbetonů v přechodové oblasti nebo na počátku třetího intervalu ( obr. 18 - ). Změna průběhu této závislosti v místech, v nichž dochází k významným změnám i v průběhu ostatních fyzikálních veličin, potvrzuje jednak vzájemnou spoji-

tost všech uvažovaných jevů, jednak jejich společnou závislost na týchž základních vlivech. Vliv vlhkosti či stupně nasycení vodními parami na mezní přetvoření je zanedbatelný. Nejmenší mezní přetvoření vykazuje polyesterový plastbeton ( $\text{ccs} \frac{1}{\text{cm}}$ )

Obr.19 dává představu o mezné objemové změně jednotlivých směsí furol-furalového plastbetonu v závislosti na teplotě: směs 1 /1:5/ nejdříve svůj objem při porušení zmenšuje, při vyšších teplotách silně zvětšuje : směs 2 ( 1:8) a 3(1:10 ) svůj objem zmenšují, nejméně při záporných a vysokých teplotách, směsi 4 / 1:15 / a 5 /1:20/ svůj objem zmenšují a objemovou změnu příliš nemění v celém rozsahu teplot / vše vtaženo k původnímu objemu/.

Ze směsí použitelných z hlediska nepropustnosti a trvanlivosti, tj. směsí s nespojitou porovitostí, jsou nestabilnější v mezních objemových deformacích - směsi ve II. /přechodném / intervalu; Ize říci, že jejich přetvárné chování nezávisí příliš na teplotě, v níž k přetvoření dochází, což je výhodné pro konstrukční využití berolu. Ještě vhodnější z toho z hlediska jsou zjevně směsi 4 a 5, t.j. směsi ve III. intervalu ; vykazují téměř konstantní mezné přetvoření a způsob přetvárného chování bez ohledu na působící teplotu.

Na druhé straně z grafu vyniká nevhodnost směsi v I. intervalu - tedy plněného pojiva - pro jakékoli konstrukční využití, při němž dochází k mechanickému namáhání při různých teplotách.

#### 7. Objemové změny plastbetonů

Důležité pro představu o primérní vnitřní napjatosti i pro praktickou použitelnost plastbetonů jsou jejich objemové změny během tvrdnutí .

Reakce tvrdnutí je vesměs exothermická. Od počátku polykondenzace nebo polymerace vzniká v tělese teplo, které jednak urychluje další proces tvrdnutí, jednak způsobuje roztažování tělesa (zvětšování objemu). Současně se vznikem tuhých vazeb (makromolekulárních řetězců) dochází ke smrštování, zmenšování objemu. Výsledným jevem pak je, že od počátku tvrdnutí dochází nejříve k nabývání, jehož přírůstek se zpomaluje až dochází k opačnému jevu - smrštování. Závisí na složení směsi, podmínkách okolního prostředí (hlavně teplotě) a nejvíce na volných teplotních kapacitách uvnitř těles i na jejich povrchu, jak rychle běží oba vlivy, kde jejich křížení způsobí změnu směrnice křivky délkové změny v čase a konečně jaký bude výsledný efekt proti prvnímu stavu: zda zvětšení či zmenšení objemu. Popsané objemové změny při tvrdnutí jsou příčinou vzniku extrémních vnitřních napětí ve struktuře, jež významnou mírou ovlivňují ostatní mechanické a fyzikální vlastnosti (pevnost, trvanlivost). Obr.20 ukazuje typický průběh délkových změn během tvrdnutí furol-furalového plastbetonu za zvýšené teploty (počínaje vložením do zvýšené teploty). Ukažuje se, že převládající vliv na výsledné délkové změny má složení směsi (poměr pojiva a plniva). Obr.21, shrnující stovky měření provedených v ÚTAMu dává představu, jak vypadá u téhož plastbetonu typický průběh konečných délkových změn vlivem tvrdnutí v závislosti na složení směsi. Průběh této změny se ovšem podstatně liší v případě tvrdnutí za normální teploty a za zvýšené teploty v důsledku zcela odlišné vnitřní napjatosti systému v obou případech.

V dalším obrázku 22 jsou porovnány ještě průběhy celkových hodnot smrštění (od nejvíce roztaženého stavu při vytvrzování za zvýšené teploty) jednotlivých plastbetonů v závislosti na složení směsi. Pro směsi prakticky nejvíce upotřebitelné / voko-

líf 1 : 10) je zachyceno smrštění při tvrdnutí mezi 0,5 % pro polyesterový k 1,5% pro furolfuralový plastbeton, což proti betonu (cca 0,2%) je několikrát více. Přihlédneme-li k nestejnoměrnosti zachyceného procenta celkového smrštění (závisí při současných metodách na rychlosti tvrdnutí) můžeme uzavřít, že celková hodnota smrštění plastbetonu není mnoho závislá na druhu použité pryskyřice a nepřestoupí v obvyklých případech 1,5%, což je jen asi 1/10 smrštění samotné pryskyřice.

Pro konstrukční využití je stejně důležitá i znalost objemových změn zatvrdlého plastbetonu vlivem změn teploty, příp. vlhkosti.

Součinitel tepelné roztažnosti plastbetonů v závislosti na složení směsi má stejný průběh jako závislost mezního přetvoření. K náhlé změně směrnice dochází opět v přechodné oblasti (na přechodu mezi nespojitou a spojitou porovitostí), jak ukazuje obr.23. Pro kladné teploty je o něco vyšší než pro teploty záporné. Pro směsi s přebytkem pojiva (v prvém, příp. na počátku druhého intervalu) je součinitel tepelné roztažnosti větší a rychle roste s přibýváním pojiva až k hodnotě  $5 - 8 \cdot 10^{-5}$  pro směs 1:1. Pro nejvíce prakticky upotřebitelné směsi (v okolí 1 : 8 - 1:15 se pohybuje součinitel tepelné roztažnosti mezi  $1,4 - 2,7 \cdot 10^{-5}$ , je tedy přibližně stejný ((nebo mírně vyšší)) jako u betonu (pro nějž se uvádí v rozmezí od 1,2 do  $2,0 \cdot 10^{-5}$ ), a pouze asi pětinou součinitele samotné pryskyřice. Malý rozdíl tepelné roztažnosti plastbetonů a betonu (nebo oceli) dává tak předpoklad k dobré spolupráci těchto materiálů při namáhání teplotou. Na druhé straně je prokázána nevhodnost nátěru ze samotné pryskyřice na beton nebo ocel pro téměř řádové rozdíly jejich součinitelů tepelné roztažnosti.

Významný je i vliv vlhkosti na materiál se spojituou porovitostí. Objemové změny způsobené změnami vlhkosti rostou tím rychleji, čím je větší absolutní hodnota vlhkosti (zvláště nad 80 % RV) a vyšší teplota: rozhodující je tedy tense par. Součinitel vlhkostní roztažnosti, zjištěný experimenty ÚTAM je od 0 do 0,7% ; podle toho změna vlhkosti o 60% odpovídá délkové změně vlivem změny teploty o  $15^{\circ}\text{C}$  (pro směsi se spojituou porovitostí). U soustav se spojituou porovitostí je tedy vliv změny vlhkosti rovnocenný běžné změně teploty. Obr. 24 ukazuje průběh vlhkostního součinitele různých plastbetonů.

Stejnými pravidly se řídí i průběh nasákovosti (porovitosti), odolnosti zmrazovacím cyklům a obecně trvanlivosti. Jde-li o směs v prvém až druhém intervalu, nemá změna vnějších podmínek znatelný vliv na jakékoli vlastnosti plastbetonů. Naopak ve třetím intervalu (v oblasti se spojituou pórovitostí) dochází při změně některých vnějších podmínek v důsledku převážně fyzikálního působení kapaliny v pórach materiálu i ke změně jeho vlastností, např. ubývání pevnosti s rostoucí vlhkostí, odolnosti mrazu atd.

#### 8. Jiné fyzikální vlastnosti plastbetonů

Důležitým dalším faktorem je soudržnost s výztuží. U některých plastbetonů s obecně velkou přilnavostí (epoxydový) lze právem očekávat i velkou soudržnost s výztuží. U jiných plastbetonů, zejména polykondensátových může být o hodnotě soudržnosti pochybnost. Také při používání kyselých tužidel je třeba zjistit jejich dlouhodobý vliv na výztuž. Ke zjištění soudržnosti bylo použito pull-out tests s velikostí vzorků  $10 \times 10 \times 40$  cm. Ukázalo se, že pevnost v soudržnosti je plně dostatečná u všech zkoumaných plastbetonů. Např. u furol-furalového byla průměrná hodno-

ta v soudržnosti  $12 - 18 \text{ kg/cm}^2$  podle druhu směsi a průměru výztuže.

Ukázalo se rovněž dlouhodobým až pět let sledováním výztuže uvnitř těles z plastbetonů, že korose výztuže vlivem kyselých tužidel při nepředávkování tužidla je tak minimální, že nemůže být v žádném případě rozhodující pro životnost konstrukčního prvku.

Podobné závěry platí i pro soudržnost plastbetonů k betonu. V nejhorším případě u polykondesátových plastbetonů je  $5\text{kg/cm}^2$ , Polymerové plastbetony vykazují soudržnost značně vyšší; např. u epoxidového plastbetonu převýší soudržnost s betonem ve tahovou pevnost všech případech některé ze spojovaných částí.

#### 9. Závěr.

Shrneme-li schematicky některé z popsaných závislostí plastbetonů v obr. 25 vidíme, že dochází v přechodné druhé oblasti ke kvantitativní změně prakticky všech zkoumaných závislostí: objemová váha, pevnost a modul pružnosti vykazují ve druhé oblasti extrémy, mezní přetvoření, smrštění a součinitel tepelné roztažnosti zde prudce mění směrnici, zatímco součinitel vlhkostní roztažnosti, porovitost, nasákovost v této oblasti rostou od nuly ke svým konečným hodnotám ve třetí oblasti.

Popsané výsledky tak plně prokázaly oprávněnost hypotézy o různém fyzikálním chování materiálů tohoto typu (nehomogenní materiál se silně odlišnými vlastnostmi pevných fází) podle druhu jeho porovitosti i nutnost zkoumat a posuzovat je odděleně ve třech samostatných oblastech: prvé s nespojitou (uzavřenou) porovitostí, druhé přechodové a třetí se spojitou

(otevřeno) porovitostí.

Velké množství provedených experimentů (z nichž jen malá část mohla být v tomto přehledu popsána) ukázalo, že plastbetony nesporně mohou být stavebním materiálem s mnohostranným použitím a vysokou trvanlivostí. Je ovšem nezbytné, vycházet ze znalosti základních vlastností, závislostí a ovlivňujících podmínek jednotlivých druhů plastbetonů i plastbetonů obecně jako jisté třídy silně nehomogenních materiálů.

• - • - •

Texty k obrázkům

- Obr.1. Vliv vlhkosti plniva na pevnost furol-furalového plastbetonu.
- Obr.2. Vliv zpracování na pevnost furol-furalového plastbetonu.
- Obr.3. Průběh tvrdnutí běžného furol-furalového plastbetonu v normálním prostředí / cca 20°C, 60% RV/.
- Obr.4. Vliv vlhkosti při tvrdnutí na pevnost furol-furalového plastbetonu.
- Obr.5. Změna objemové váhy, pevnosti v tlaku a v tahu za ohýbu různých plastbetonů se změnou jejich složení.
- Obr.6. Změna pevnosti furol-furalového plastbetonu se složením směsi v prostředí různé vlhkosti.
- Obr.7. Závislost hranolové pevnosti furol-furalového plastbetonu na teplotě při různém složení směsi.
- Obr.8. Průběh póravitosti různých plastbetonů v závislosti na složení směsi.
- Obr.9. Změna pevnosti furol-furalového plastbetonu s časem.
- Obr.10. Trvalá pevnost/v tahu za ohýbu/furol-furalového plastbetonu.
- Obr.11. Změna průhybů/creep/ furol-furalového plastbetonu v čase za různých teplot.
- Obr.12. Závislost dynamických a statických podílů pružnosti různých plastbetonů na složení směsi.
- Obr.13. Vliv složení směsi furol-furalového plastbetonu na tvar pracovního diagramu/podélné, příčné a objemové deformace/ a Poissonova součinitele.
- Obr.14. dtto jako ad 13 pro fenol-formaldehydový plastbeton.
- Obr.15. dtto jako 13 pro epoxydový plastbeton.
- Obr.16. dtto jako ad 13 pro polyesterový plastbeton.

Obr.17. Změna pracovního diagramu /podélné, příčné a objemové deformace/ a Poissonova součinitele furol-furalového plastbetonu s teplotou.

Obr.18. Závislost mezního přetvoření v tlaku různých plastbetonů na složení směsi .

Obr.19. Závislost mezné objemové změny furol-furalového plastbetonu na teplotě -.

Obr.20. Průběh délkových změn během tvrdnutí furol-furalového plastbetonu za zvýšené teploty.

Obr.21. Závislost konečných délkových změn vlivem tvrdnutí na složení furol-furalového plastbetonu.

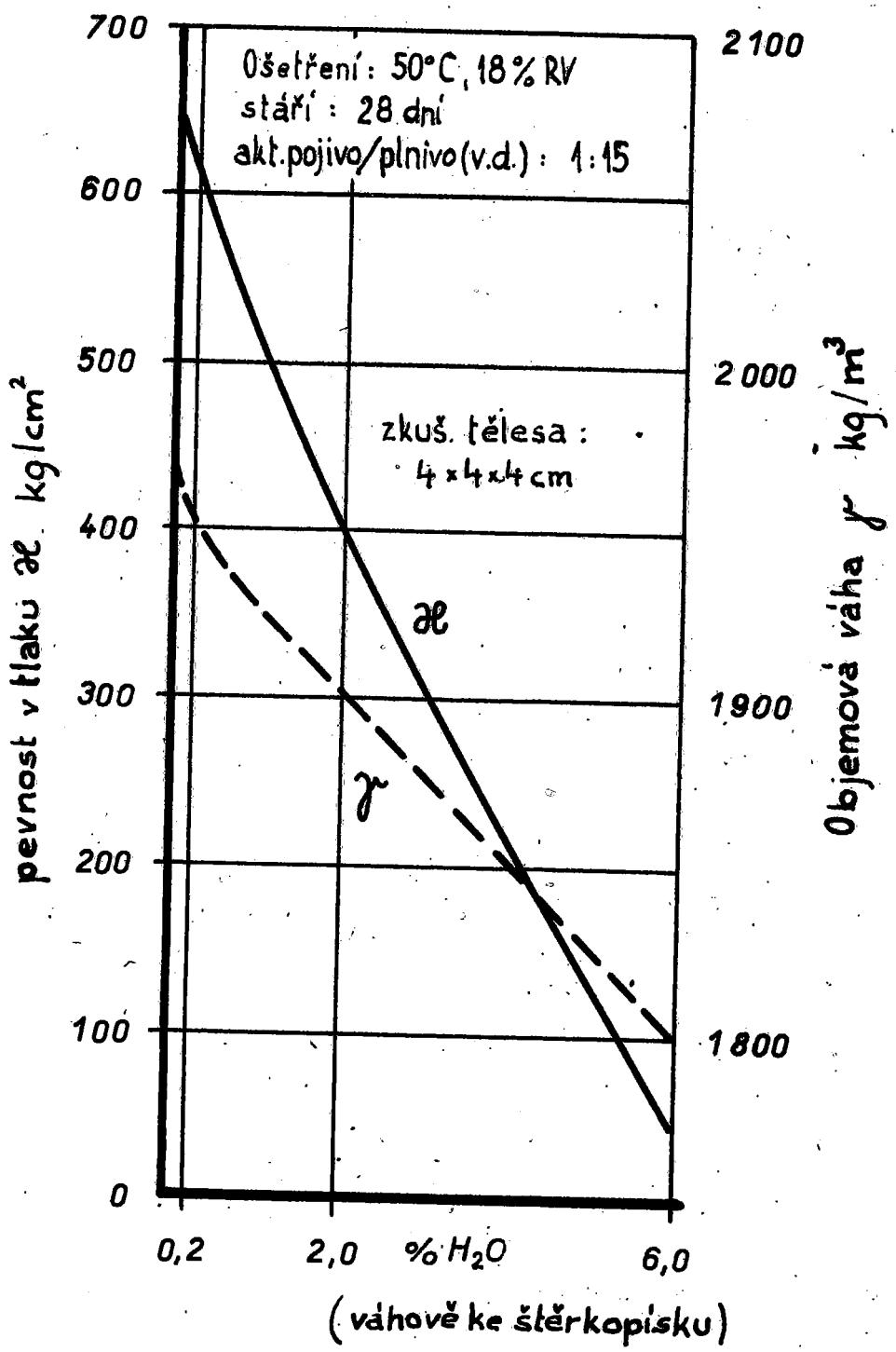
Obr.22. Průběh celkových hodnot smrštění / při vytvářování za zvýšené teploty / jednotlivých plastbetonů v závislosti na složení směsi.

Obr.23. Změna součinitele tepelné roztažnosti různých plastbetonů se složením směsi.

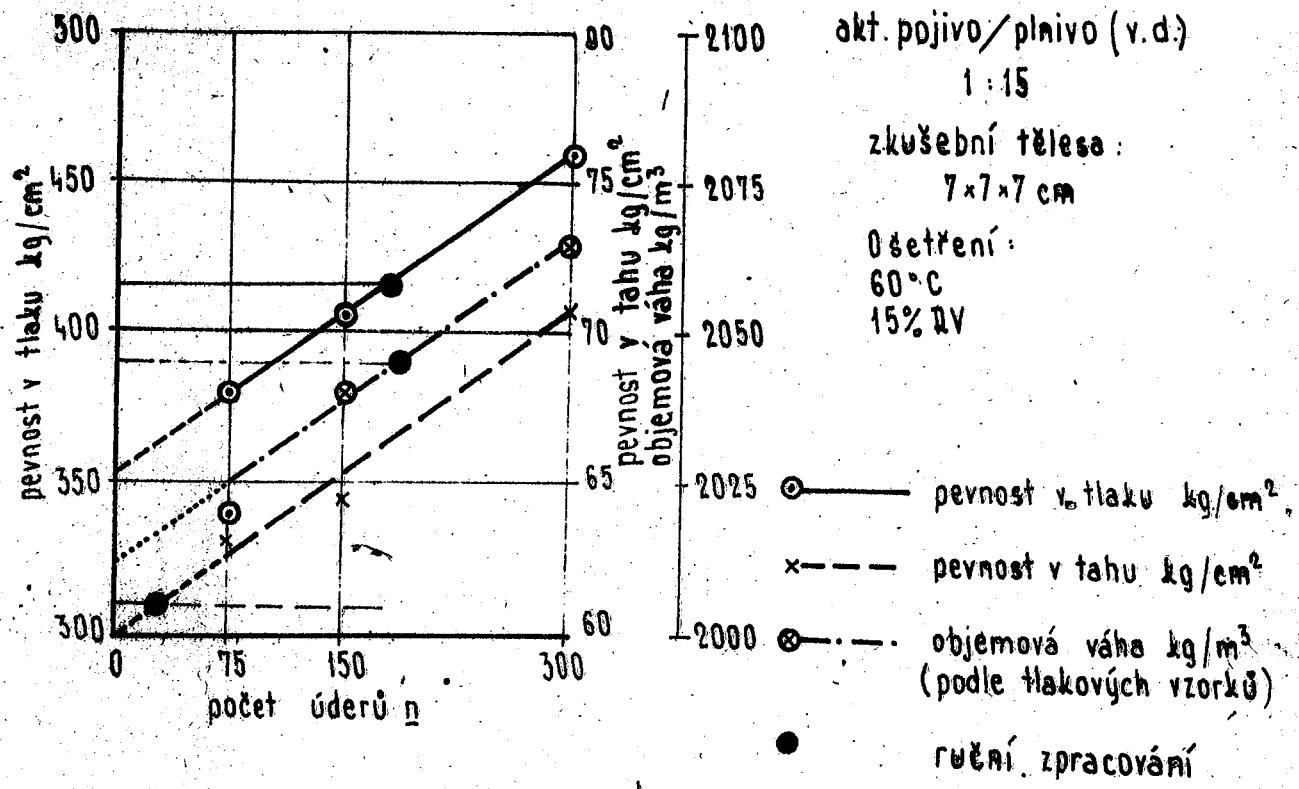
Obr.24. Průběh součinitele vlhkostní roztažnosti různých plastbetonů v závislosti na jejich složení.

Obr.25. Schematické znázornění získaných poznatků o mechanických a fyzikálních vlastnostech plastbetonů.

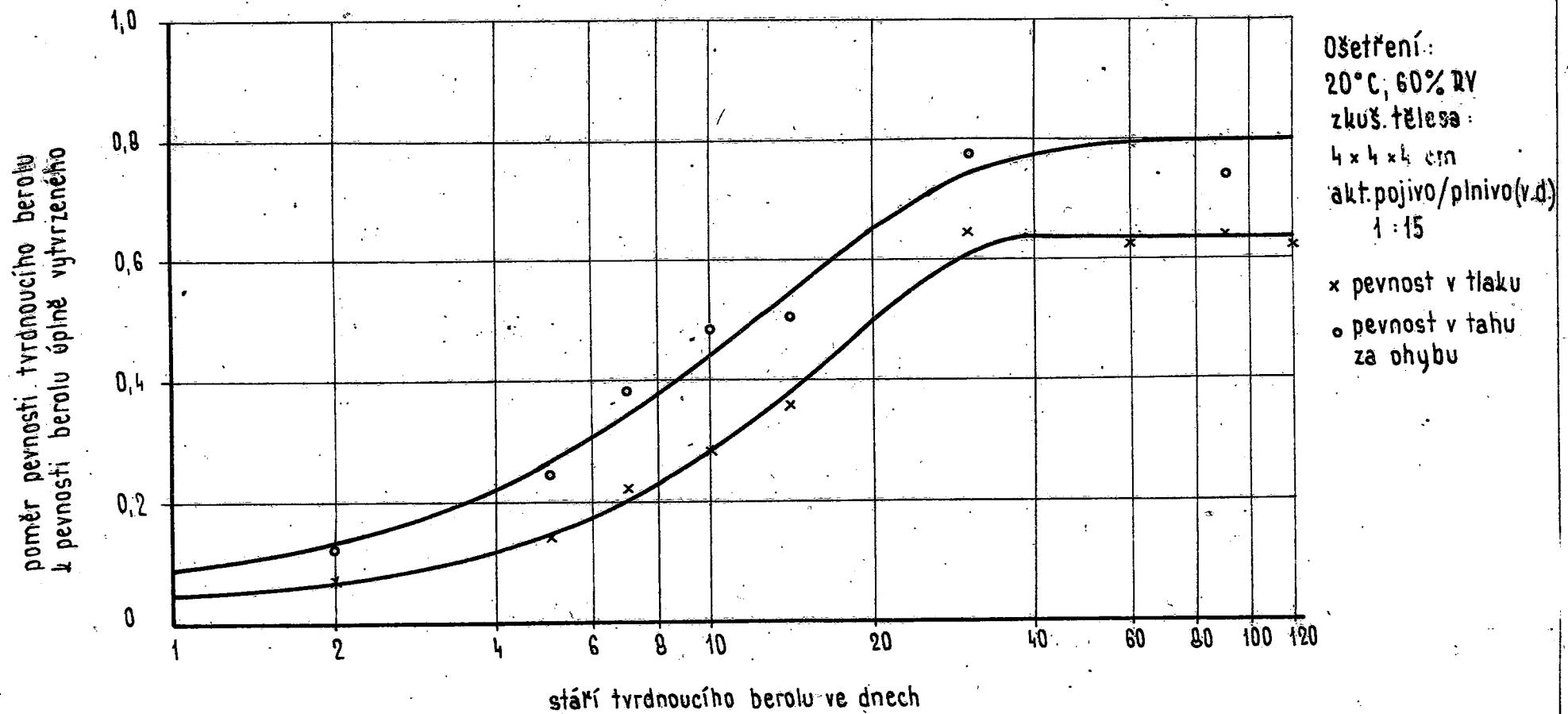
místní Polymerové charakteristiky	Příklady	Užití
A Ohebné a krystalisace schopné řetězce	Polyethylen polypropylen polyvinylchlorid nylon	nádoby, roury, tenké filmy, volanty látky, košile, obleky, povrchy
B Příčně síťovaná, amorfni síť ohebných řetězců	Fenolformaldehyd vulkanisová pryž polyesterové obleky polymery	televezní skříně telefonní přijímače pneu, transport. pásy, hadice povrch automobilů a zařízení
C Tuhé řetězce	polyimidy žebříkové molekuly	vysokoteplotní izolace, teplotní ochrany
1 Krystalinické oblasti ve viskozních síťovinách	terylen(dacron) celulosový acetát	vlákna a filmy "
2 Poměrně malé příčné zesítění a jistou krystalinitou	neopren polyisopren	olejům vzdorné pryžové zboží zvlášt odolné pryžové zboží
3 Tuhé řetězce, část.příčně ze sítěné	teplu vzdorující materiály	tryskové a raketové motory a plasmová technologie
4 Krystalinické oblasti s tuhými řetězci mezi nimi a příčné vazby mezi řetězci	Materiály vysoké pevnosti a tepelné odolnosti.	Stavby a vozidla



OBR. 1

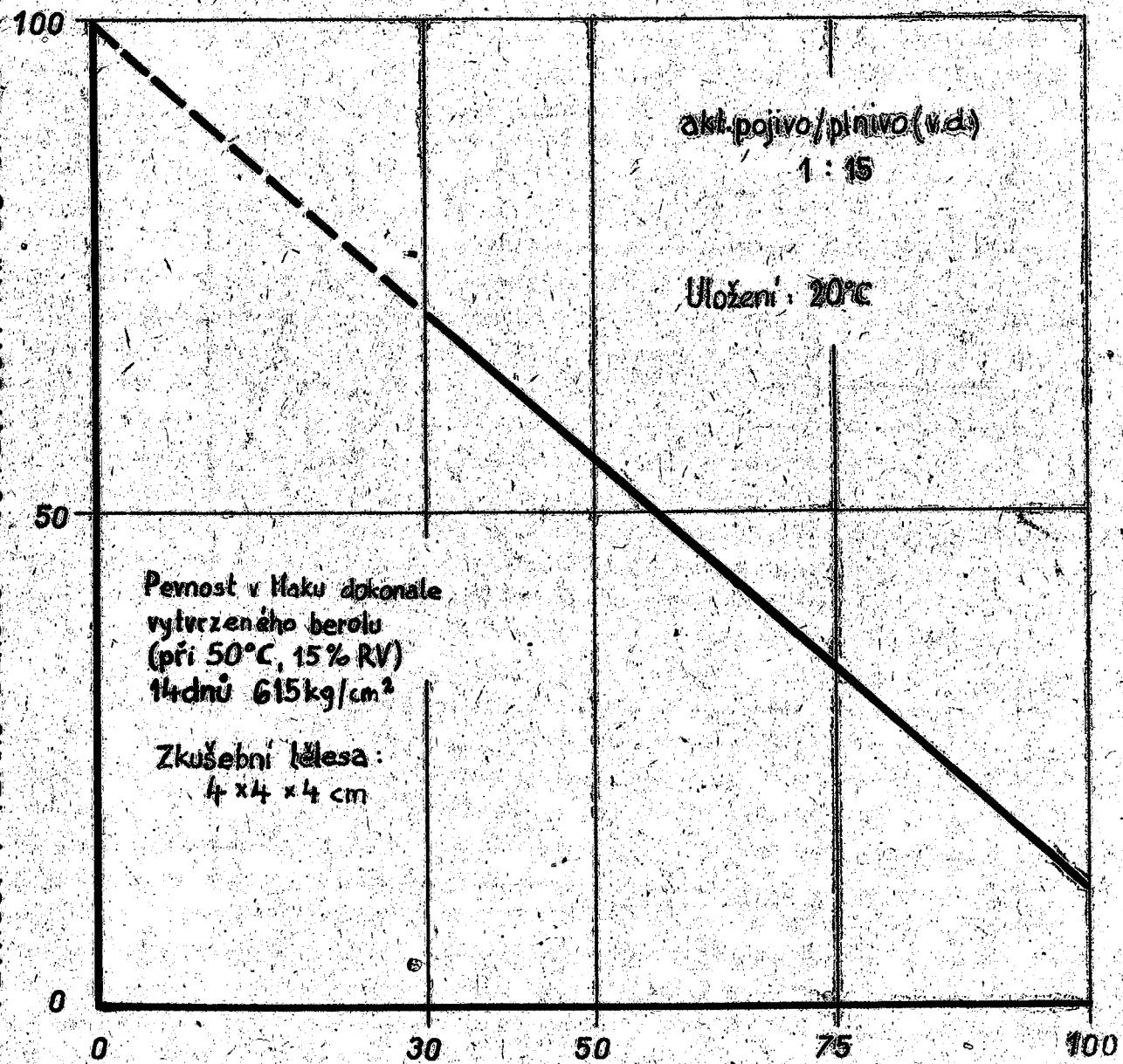


OBR. 2

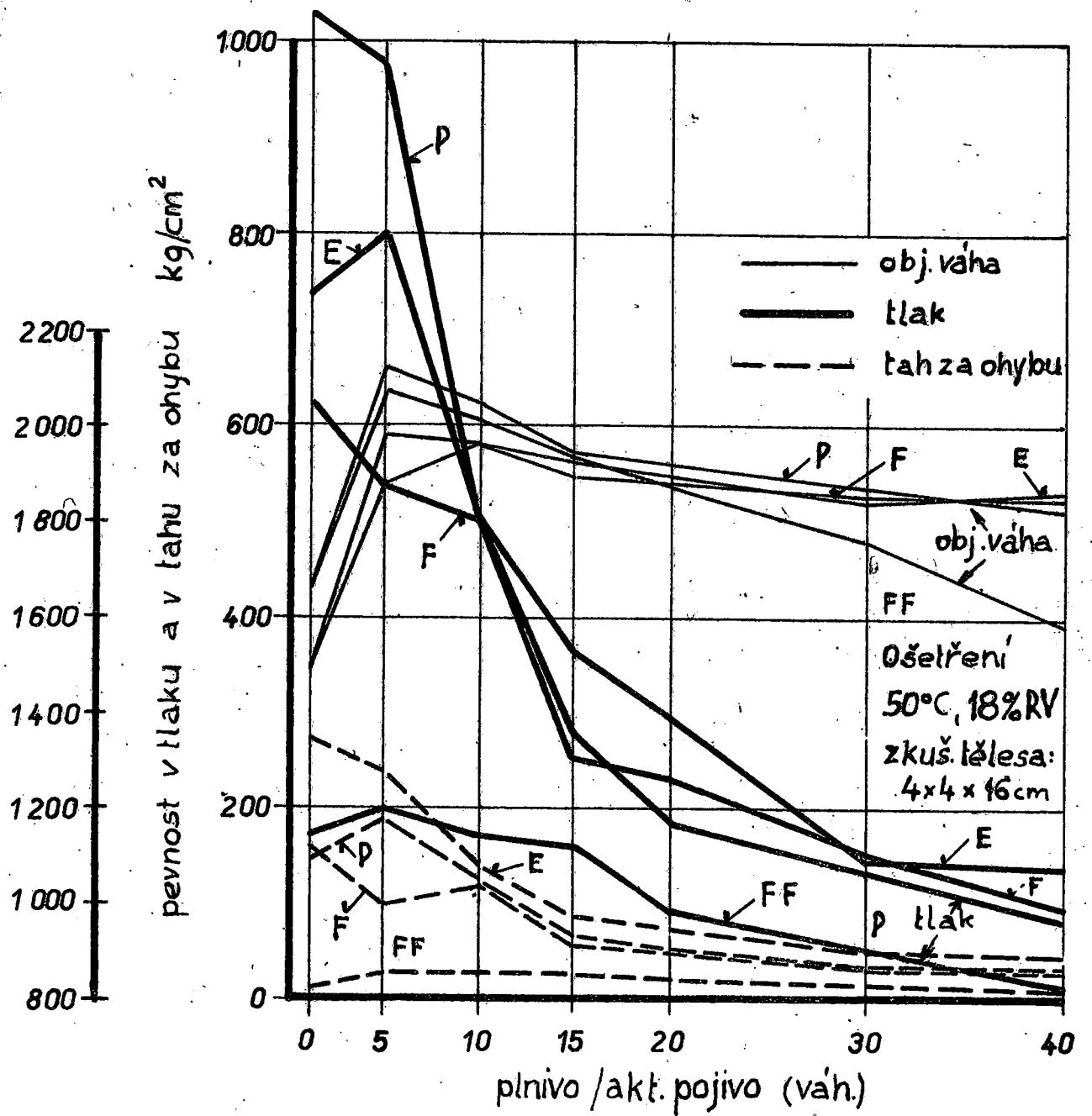


OBR. 3

PEVNOST V TLAKU BEROLU V % PEVNOSTI PŘI DOKONALEM VYTVRZENÍ



OBR. 4

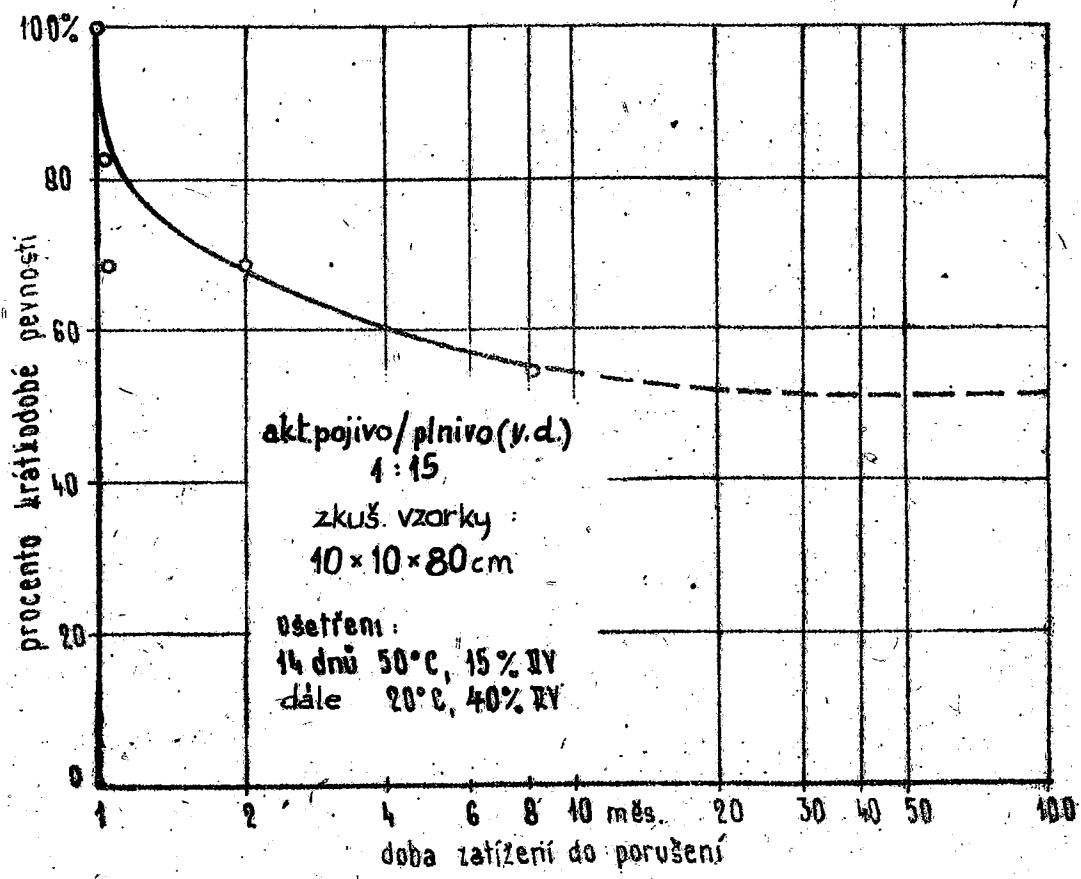


E = epoxydový plastbeton      teplota při tvrdnutí 50°C

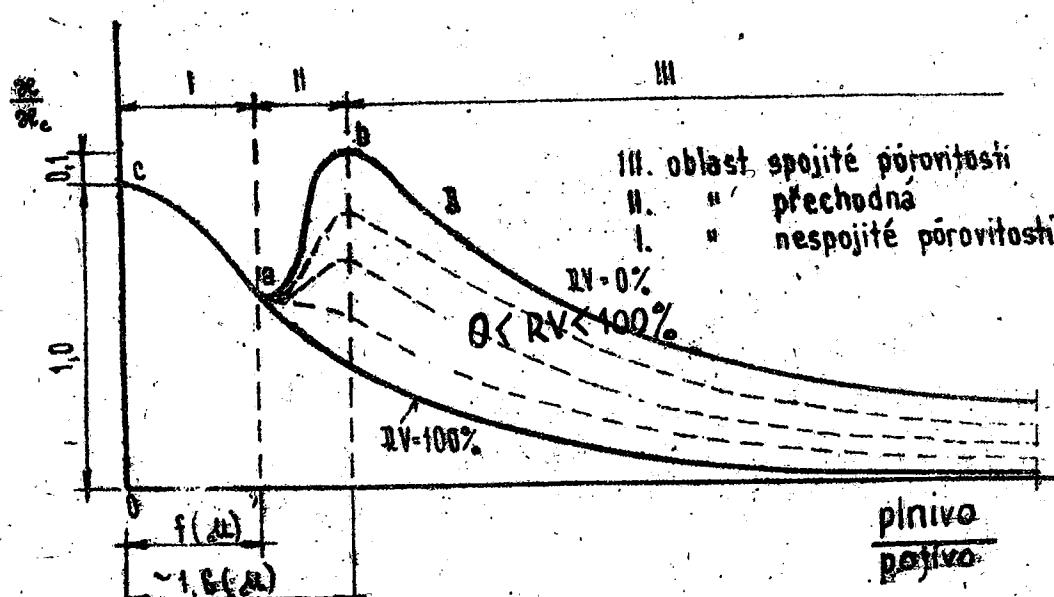
FF = fenol-formaldehyd. plastbeton      vlhkost - 18% RV

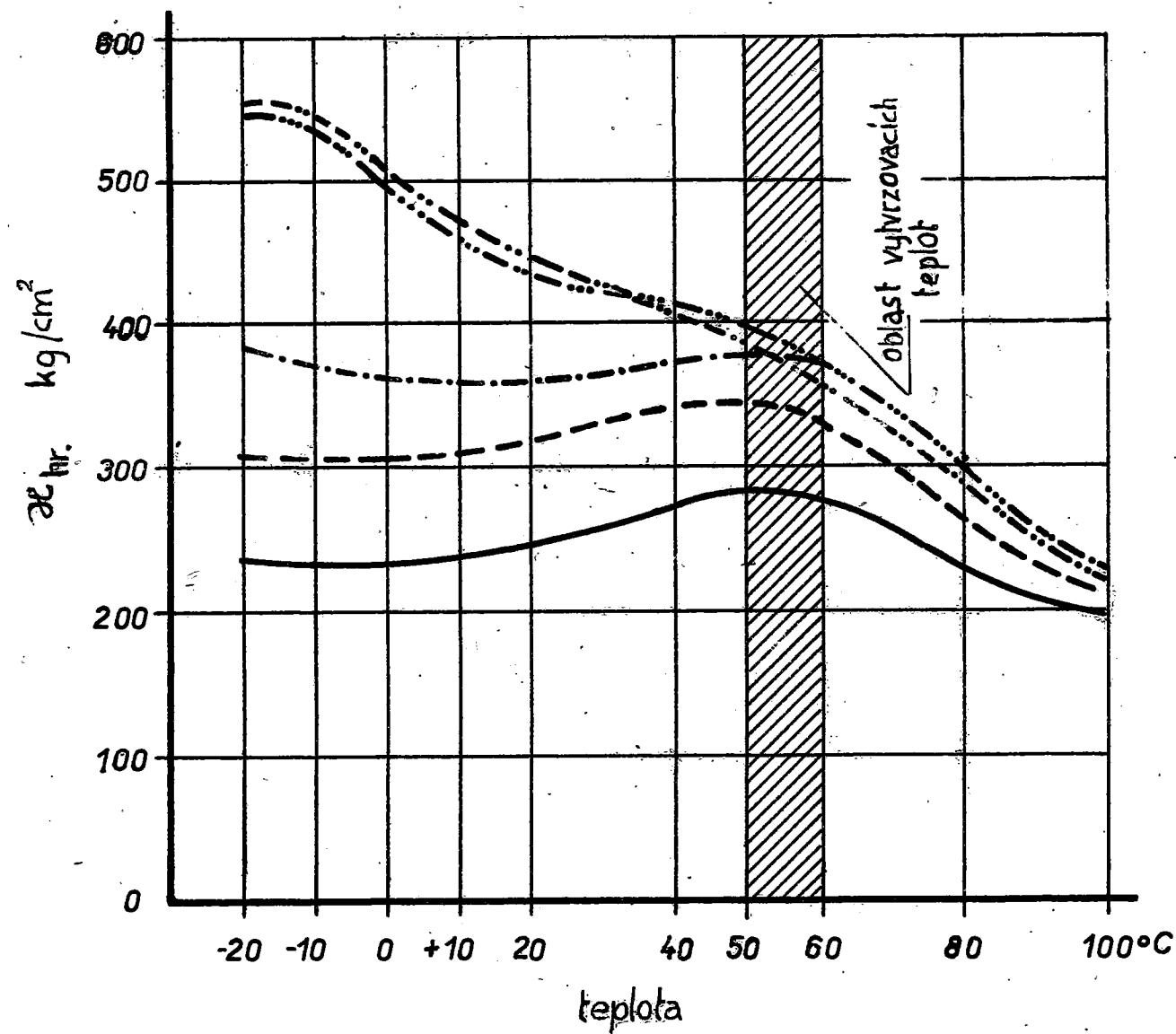
P = polyesterový plastbeton

F = furol-furalový plasibeton



OBR. 10





aktivní pojivo / plnivo (v.d.)

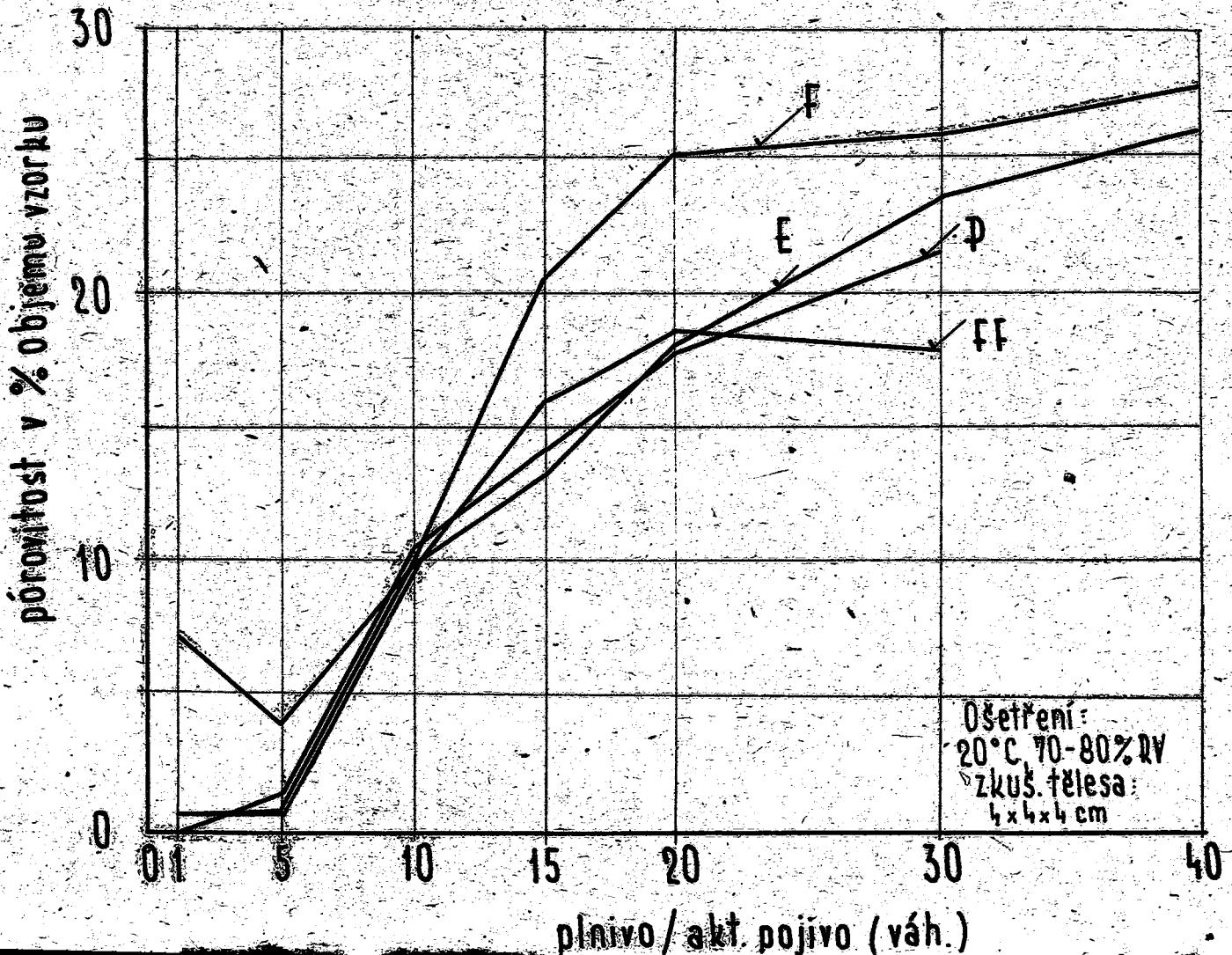
1 : 20  
1 : 15  
1 : 10  
1 : 8  
1 : 6  
1 : 5

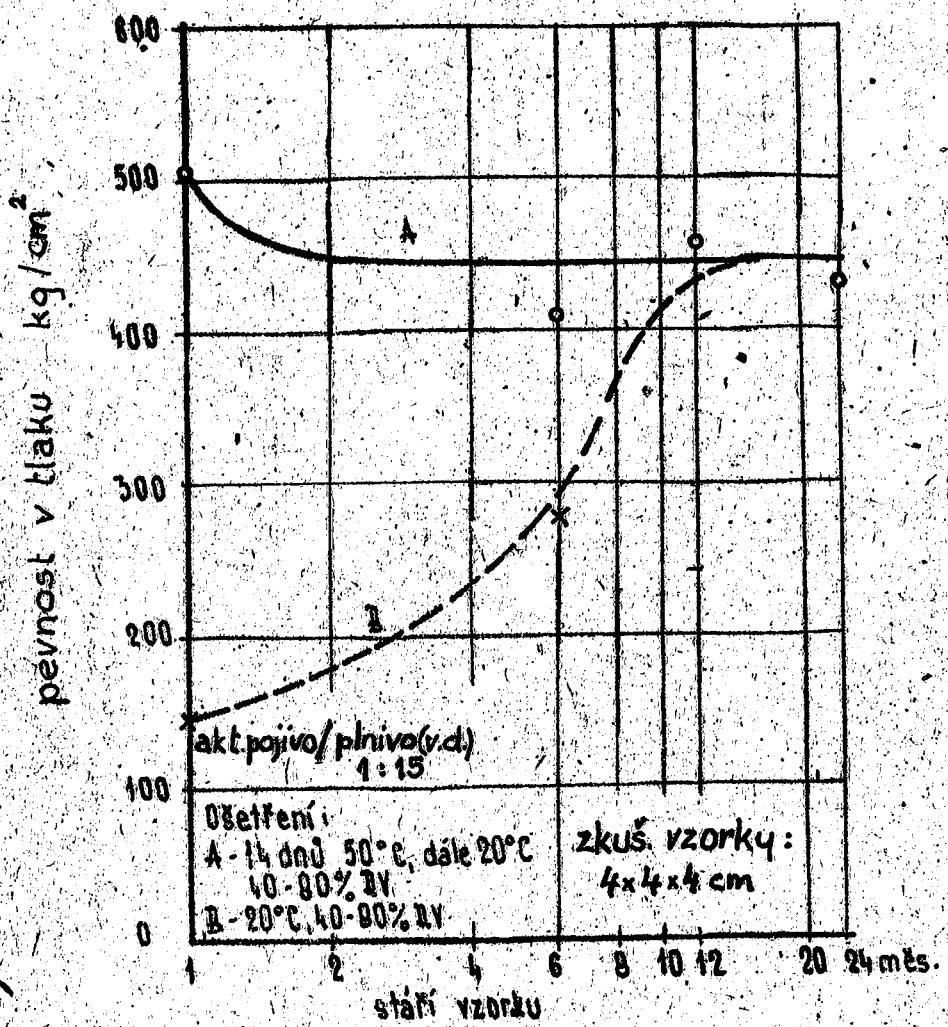
Ošetření:

$50^{\circ}\text{C}-60^{\circ}\text{C}, 18\% \text{ RV}$

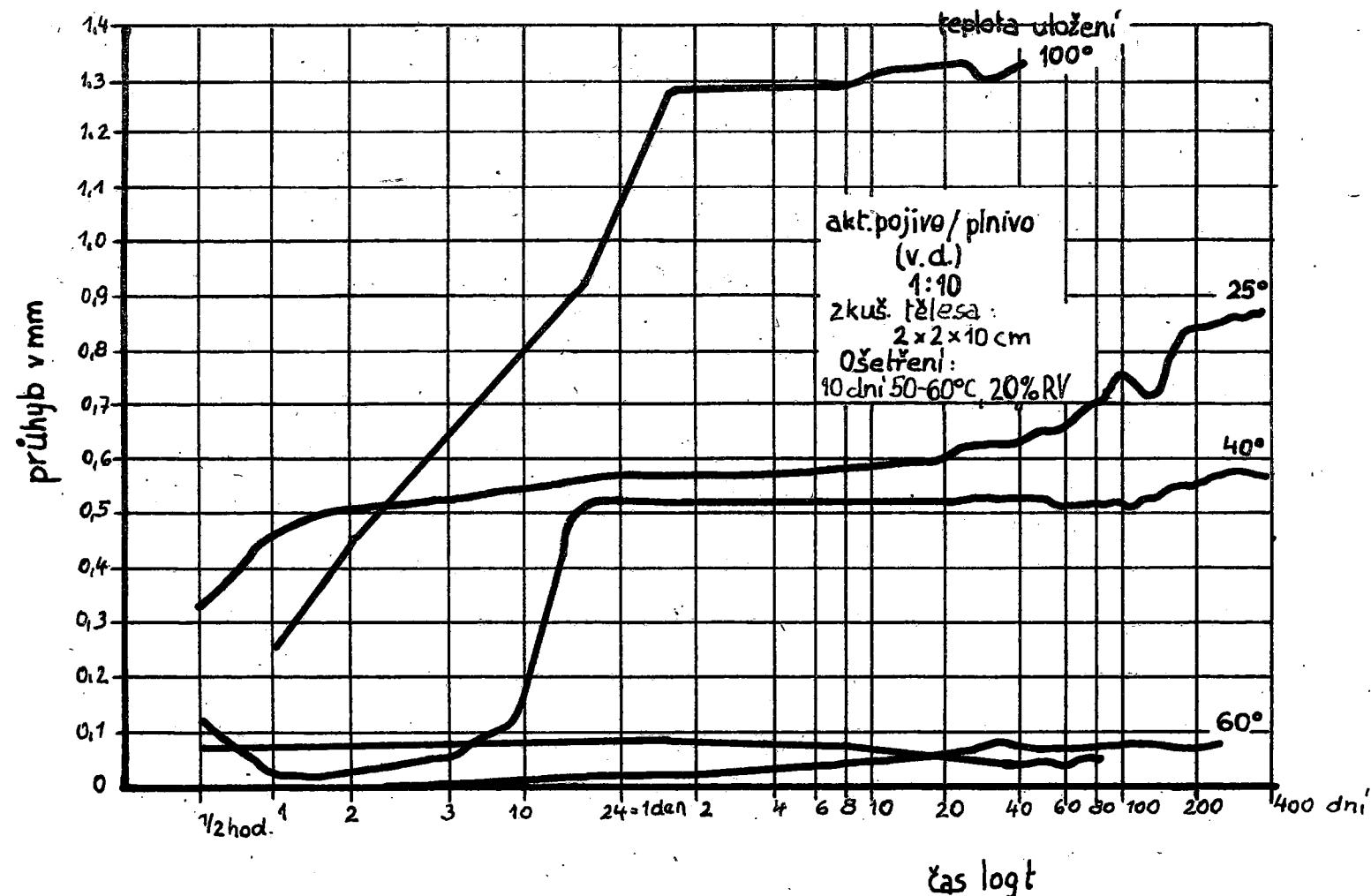
zkušební tělesa:

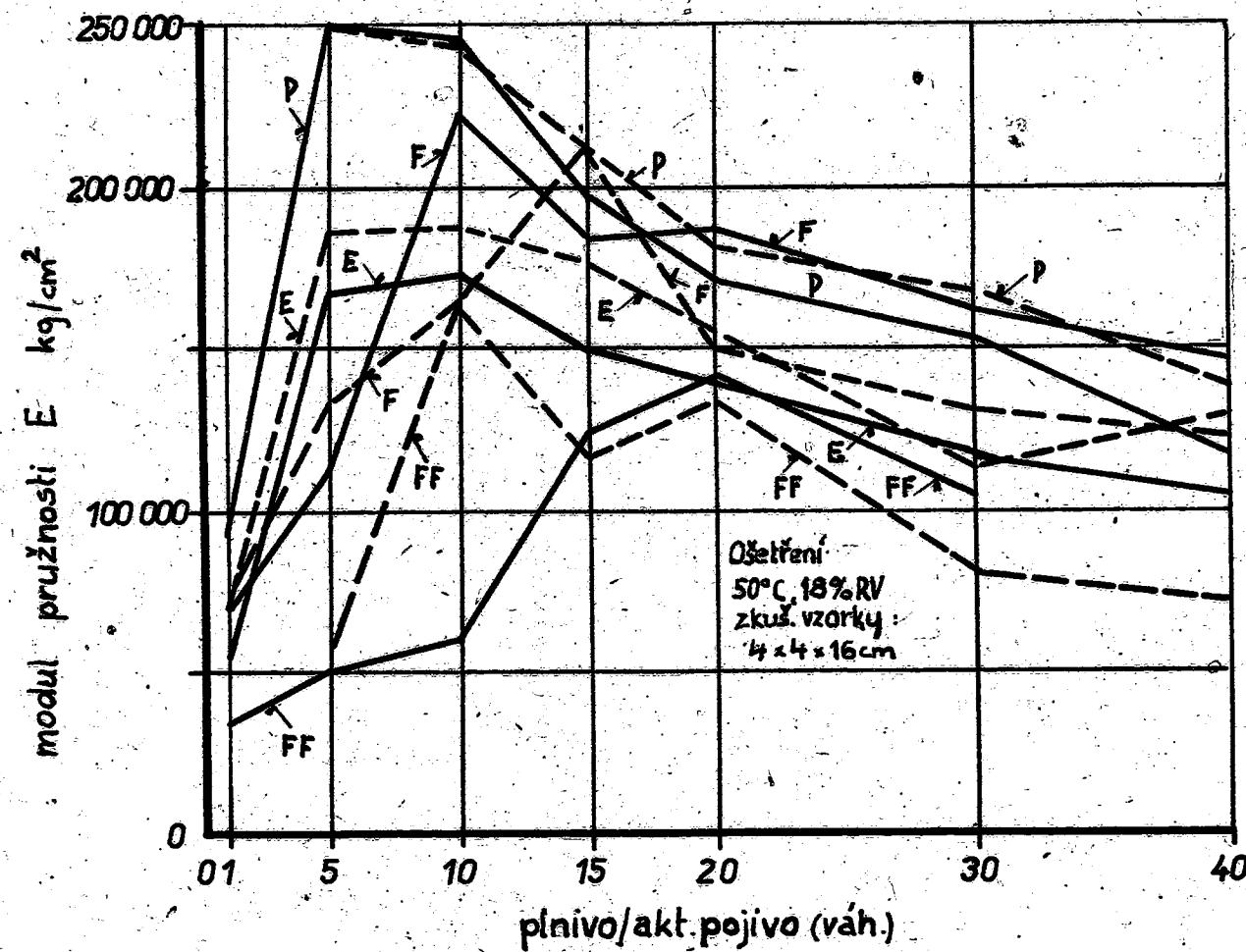
$4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$





OBR. 9

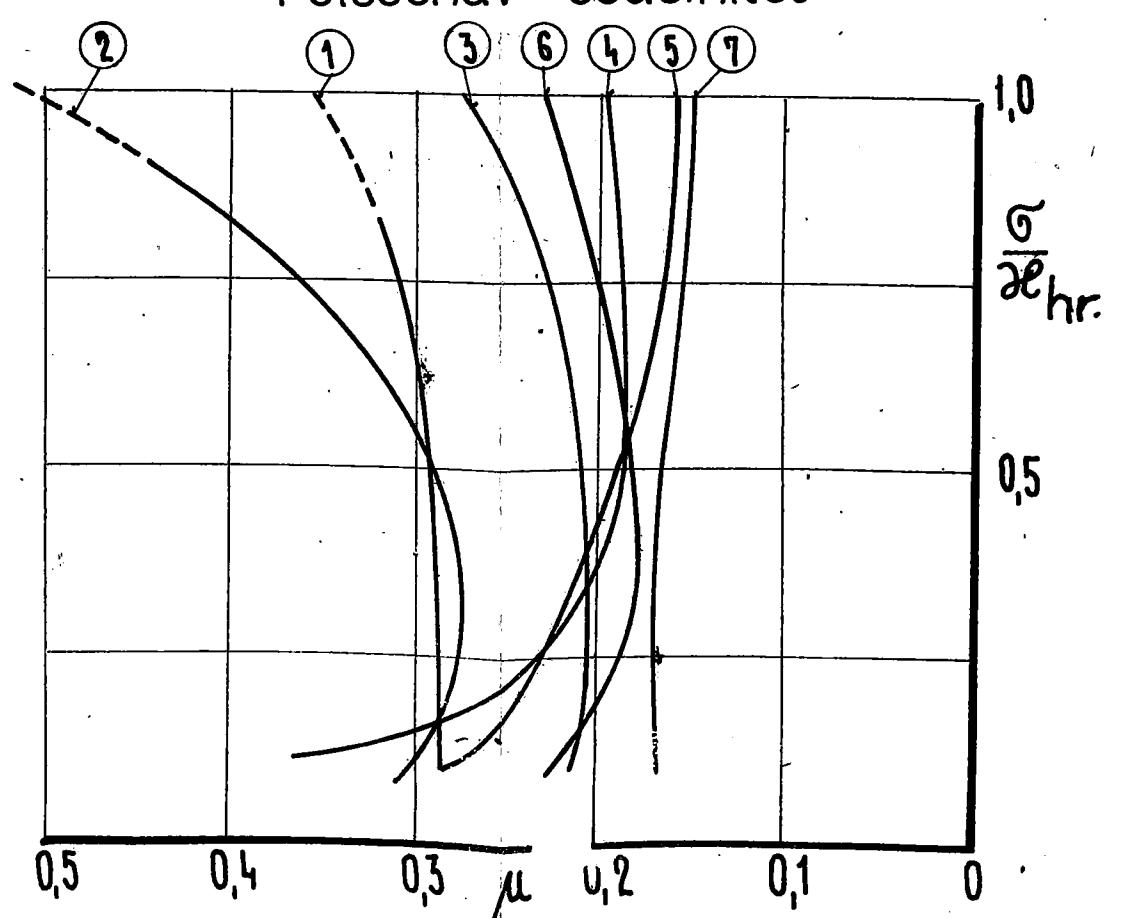
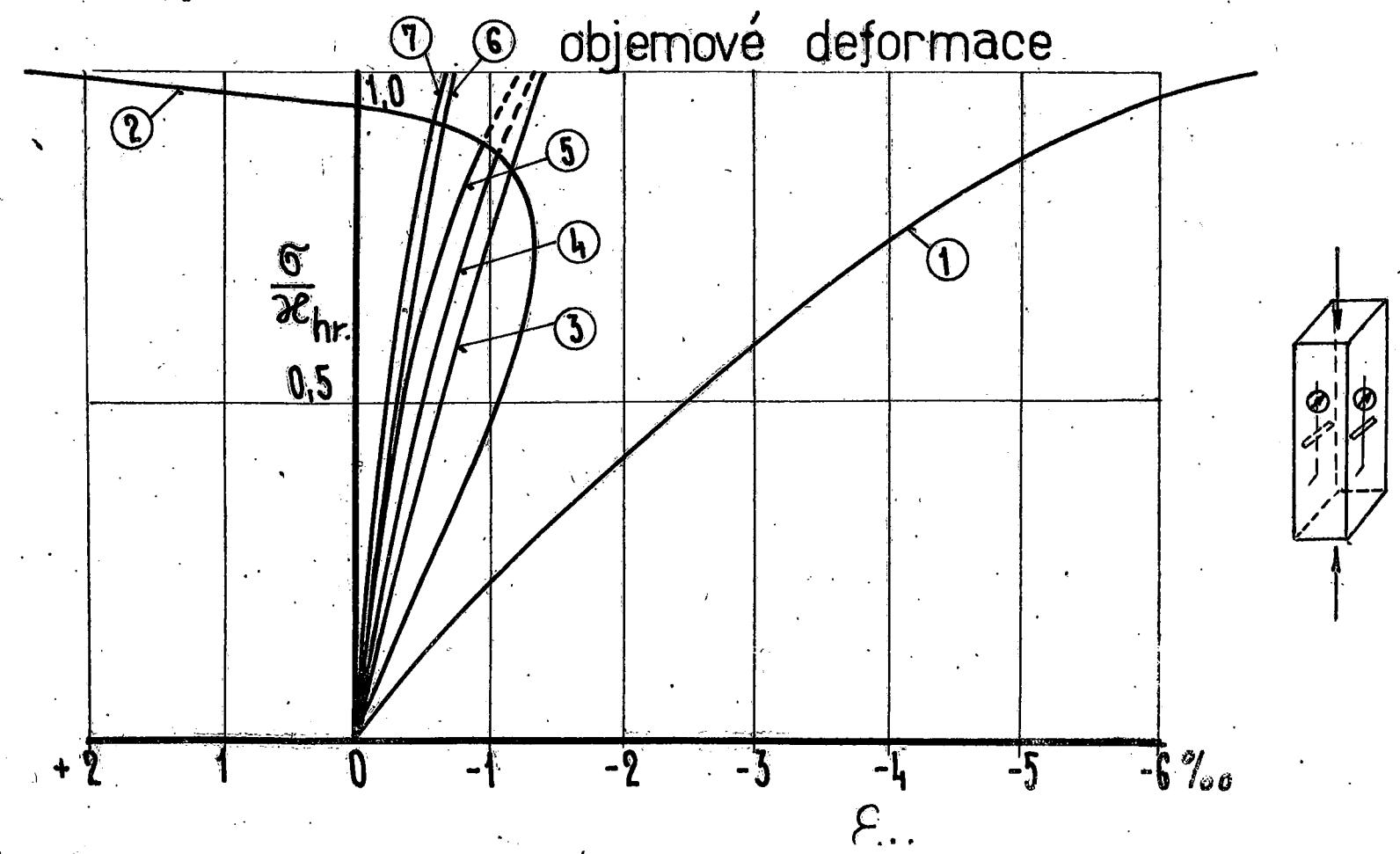
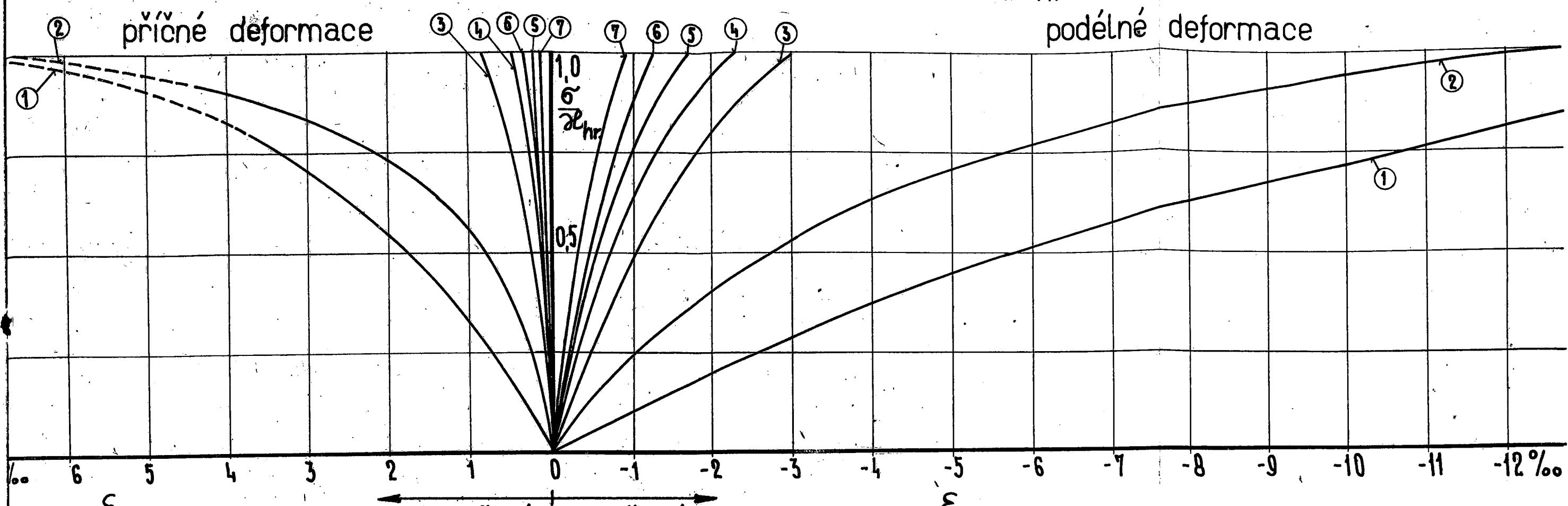


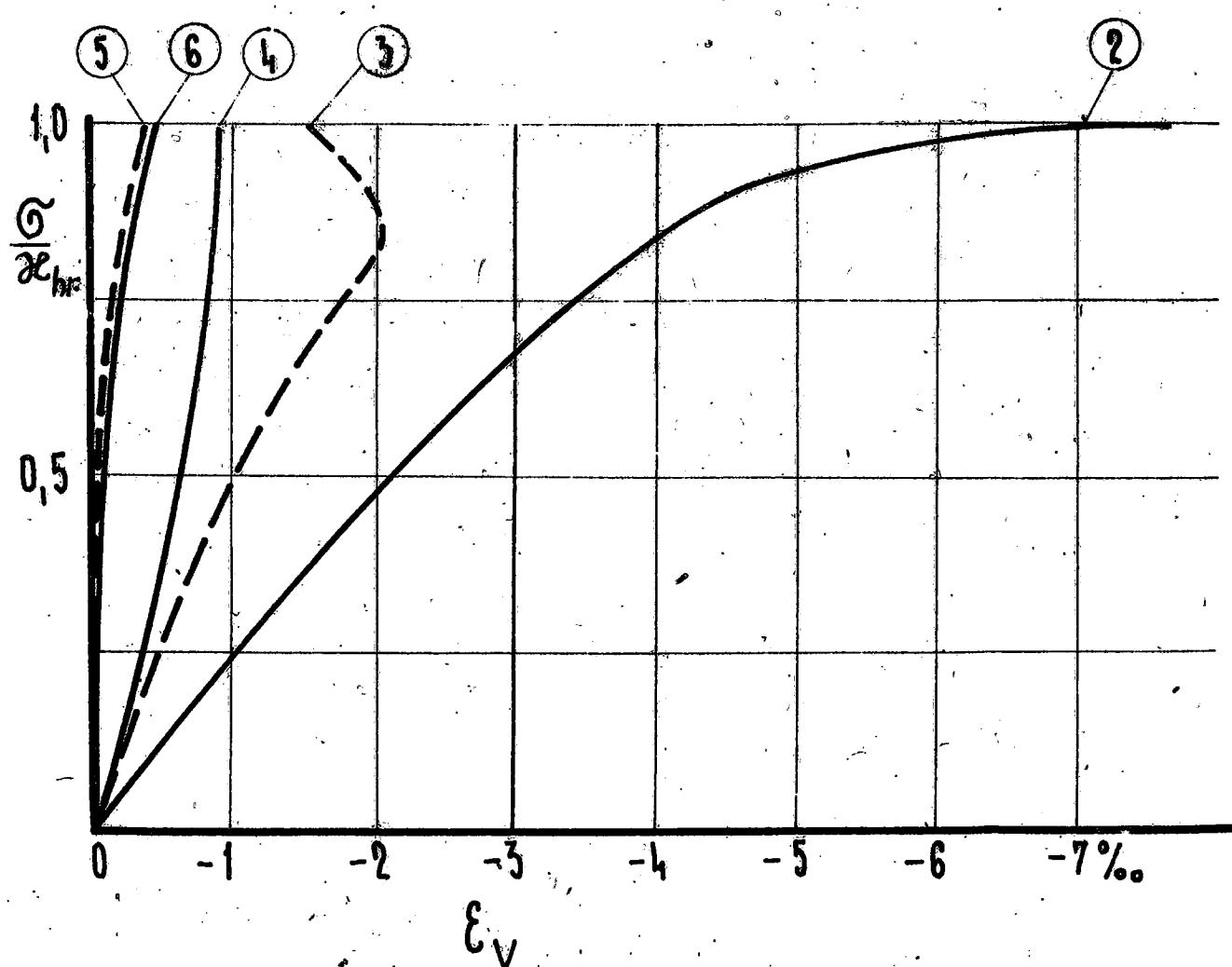
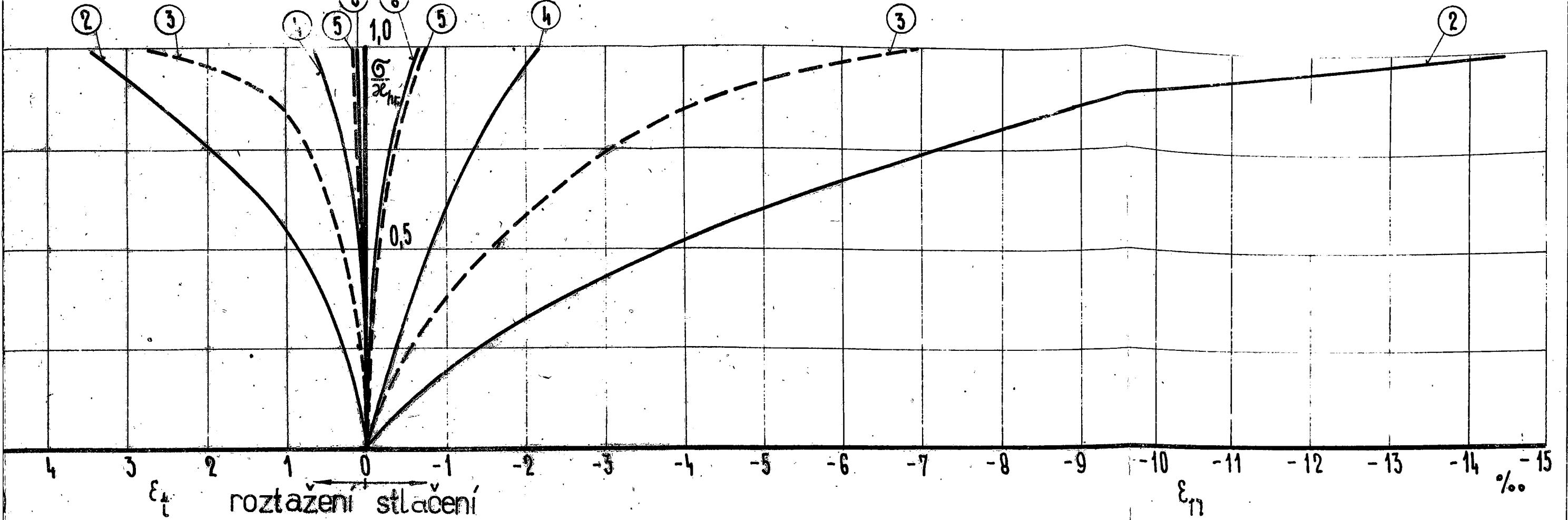


— — dynamický modul pružnosti

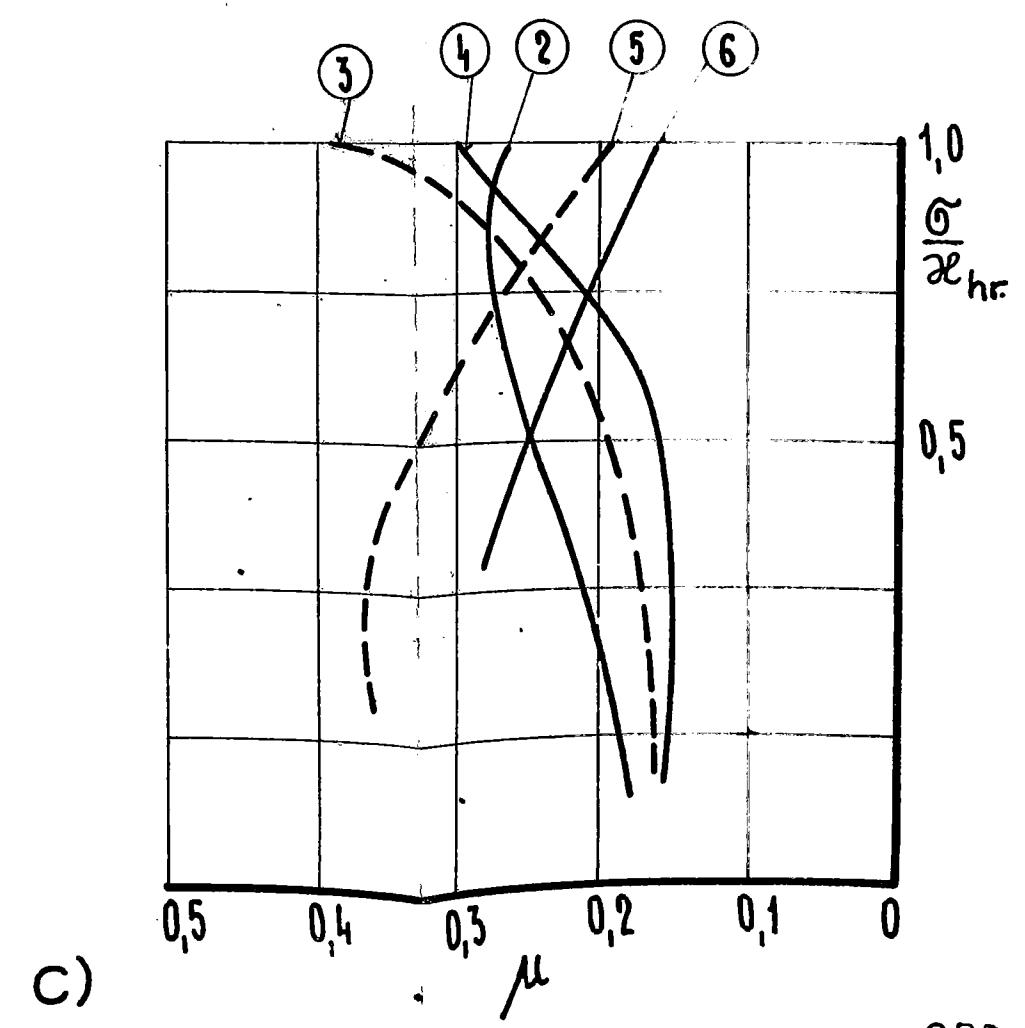
— průměrný modul pružnosti

ošetření:  $50^{\circ}\text{C}, 18\% \text{RV}$  zkuš.vz.  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$

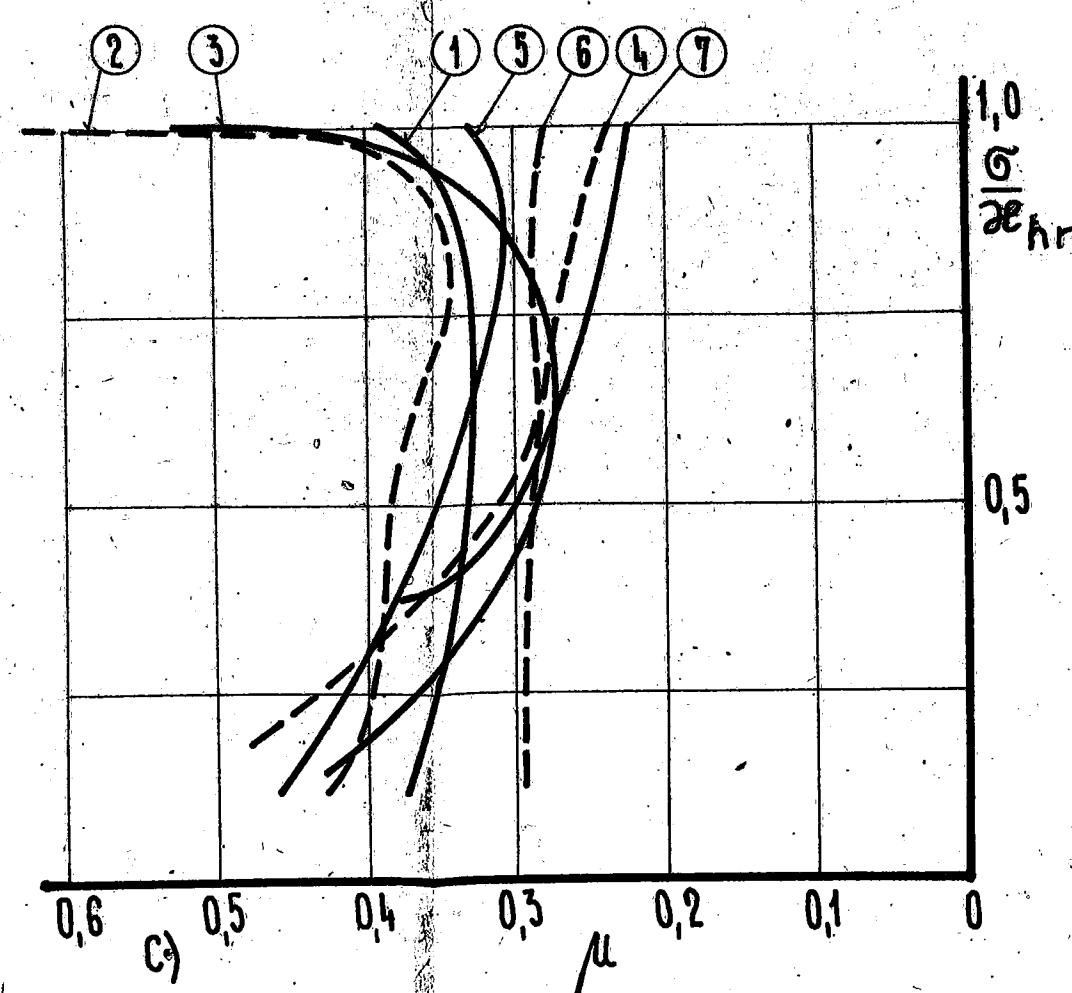
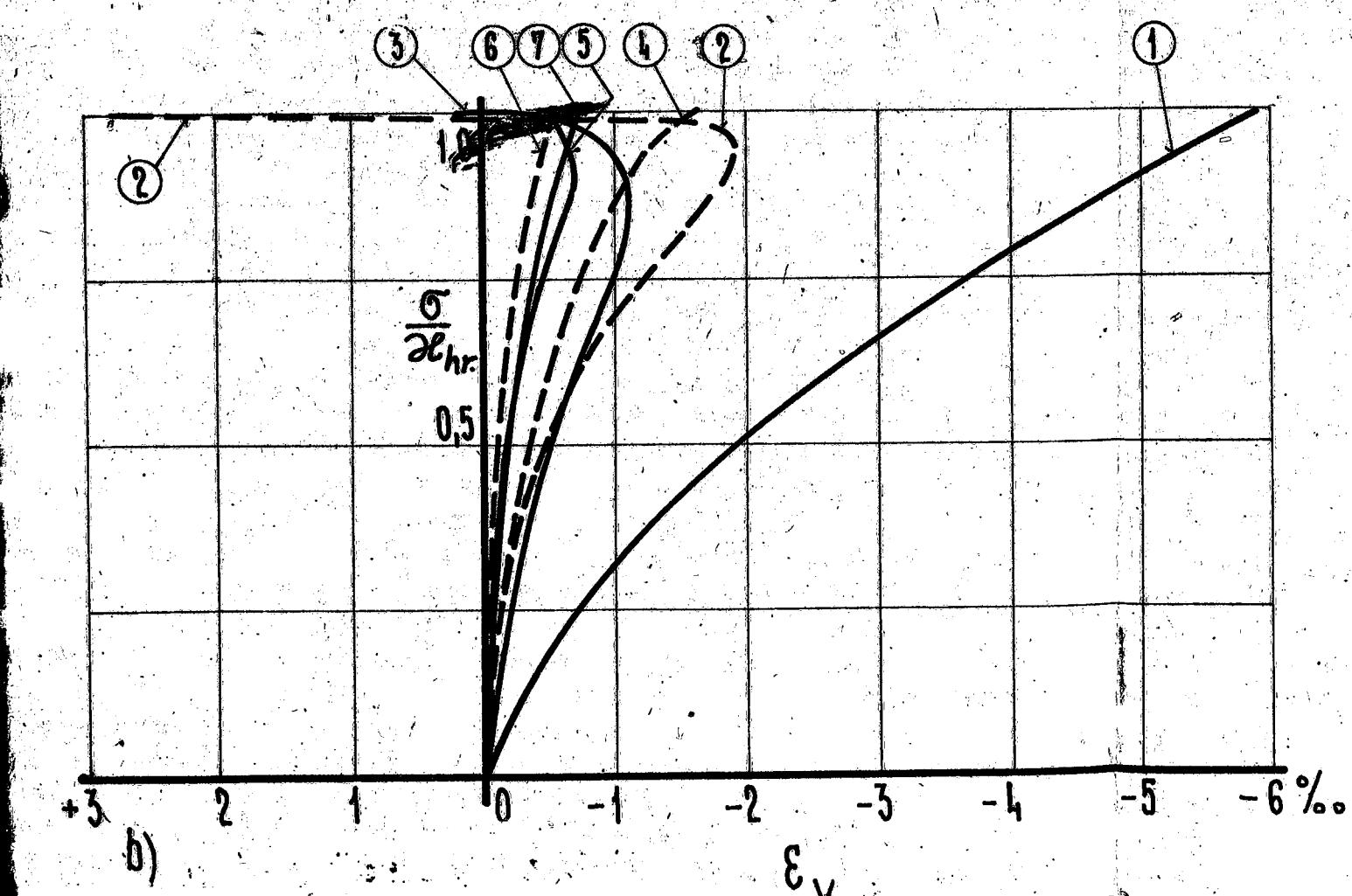
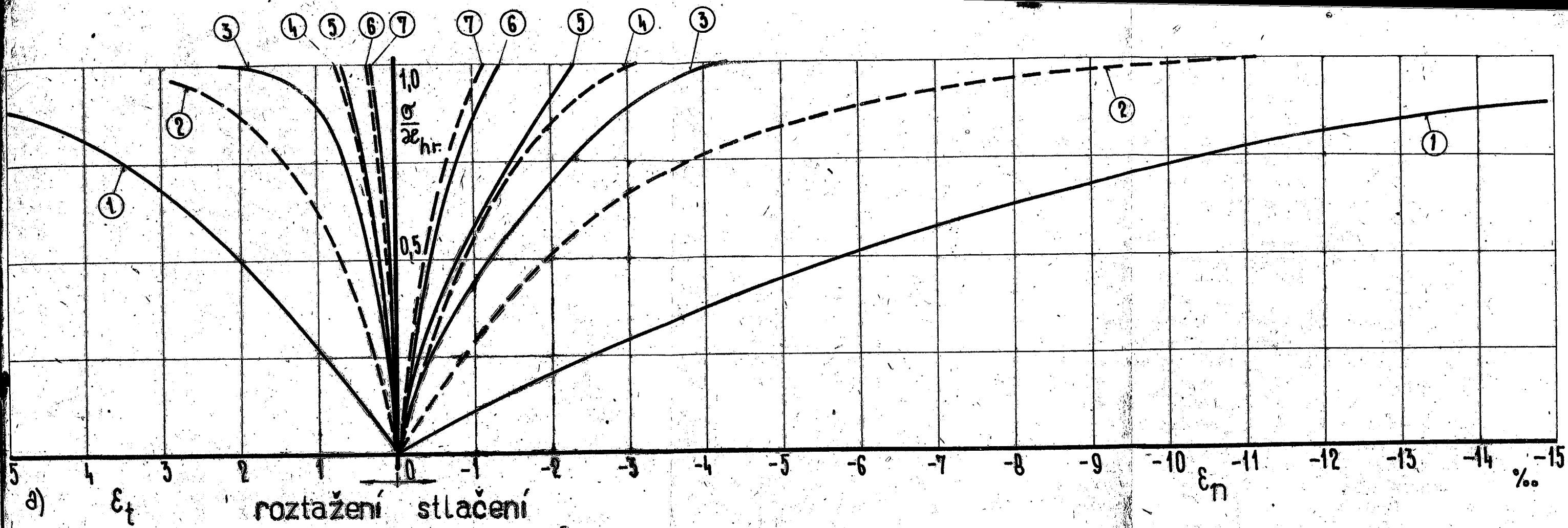


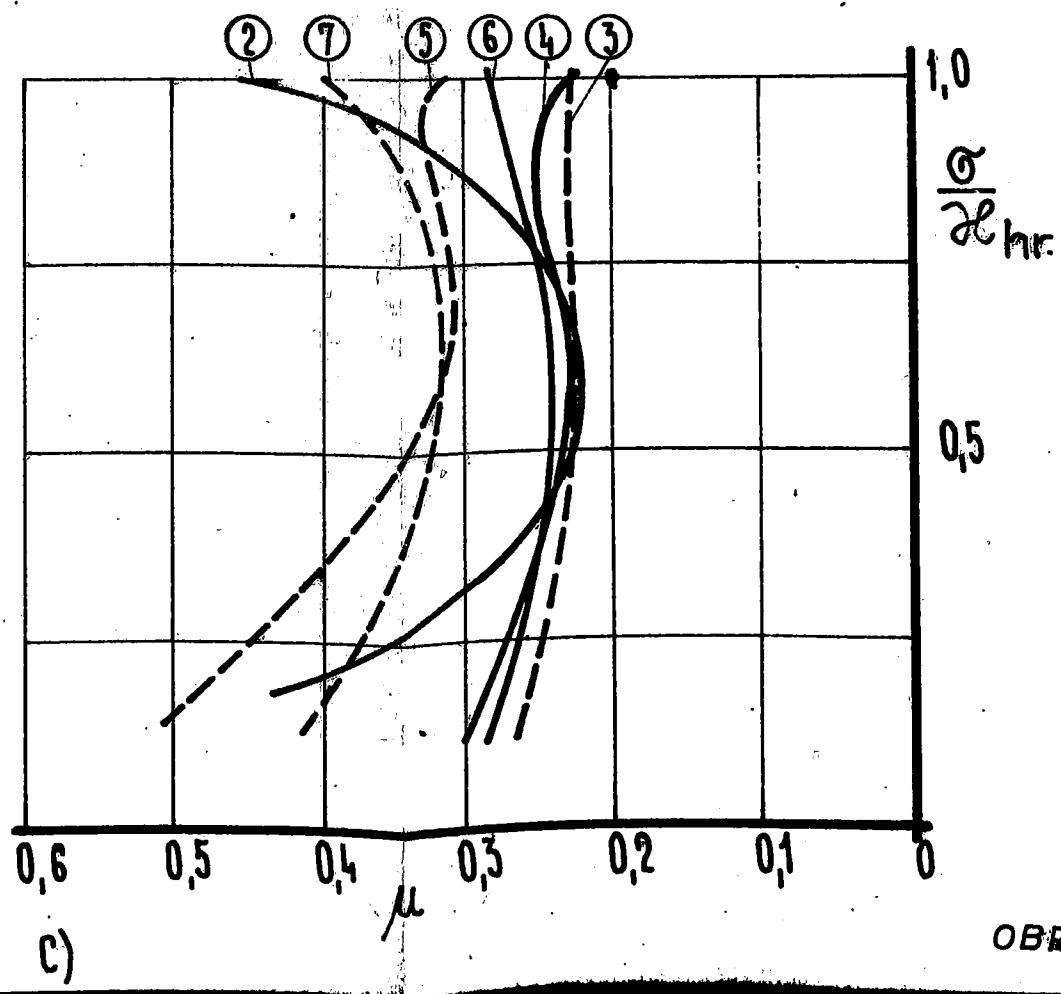
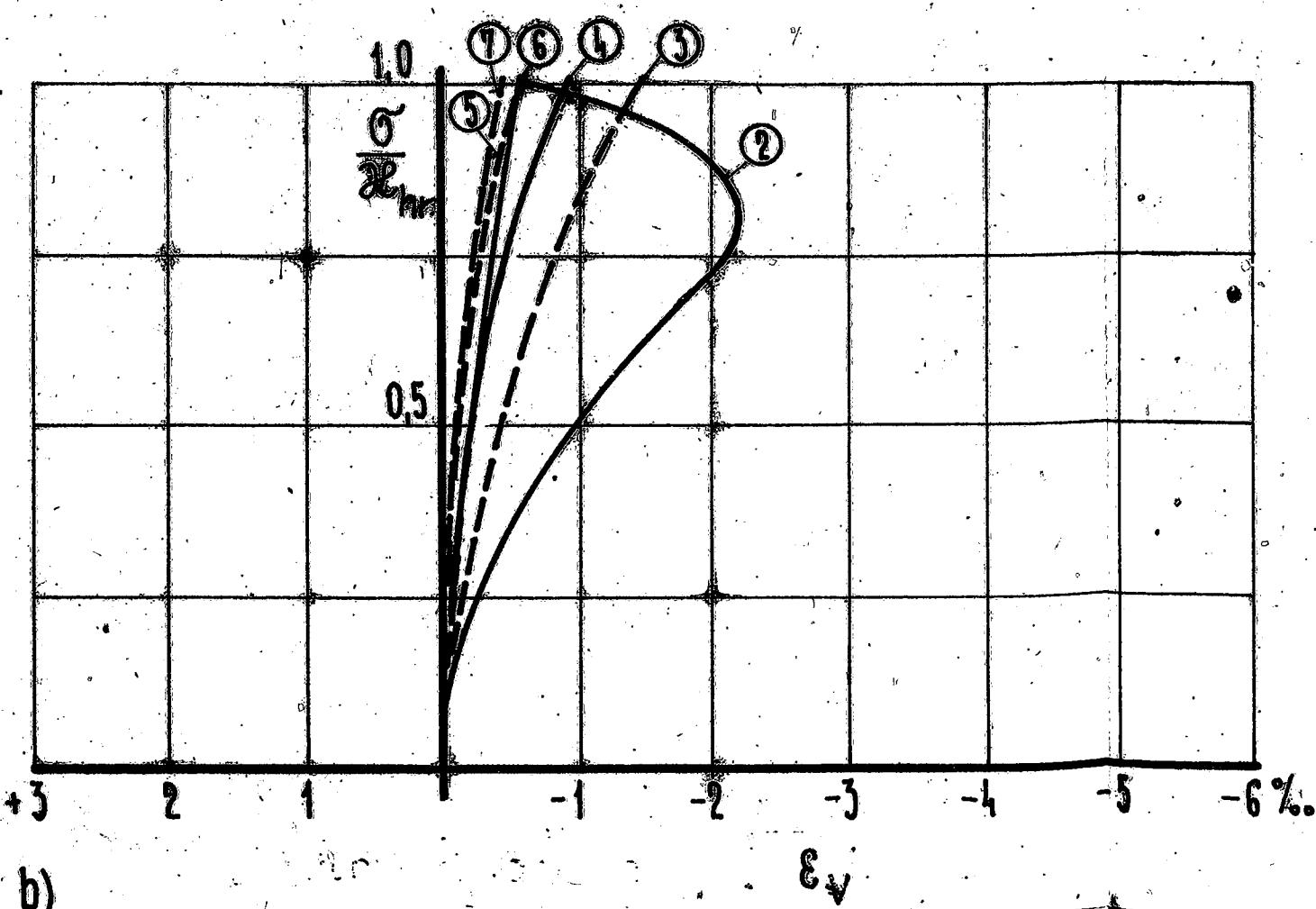
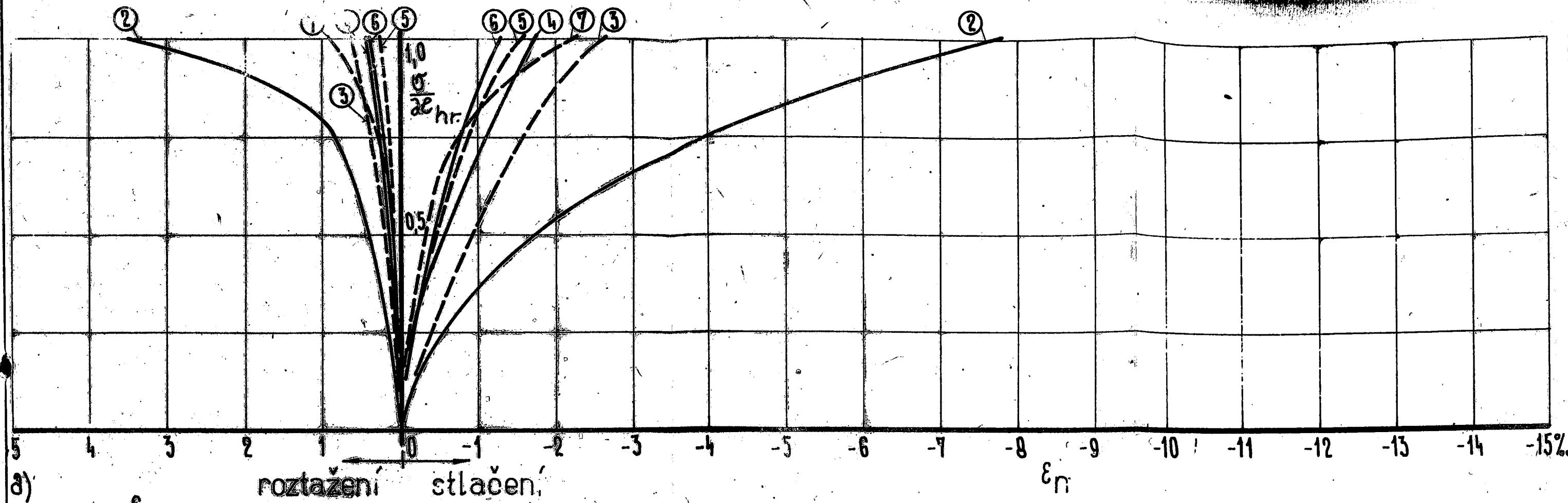


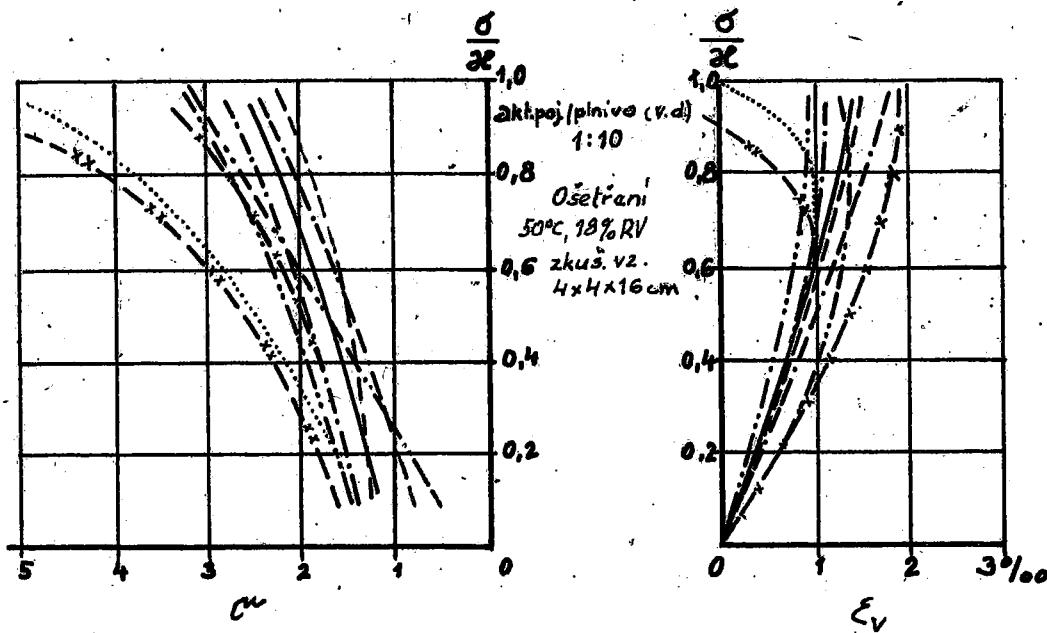
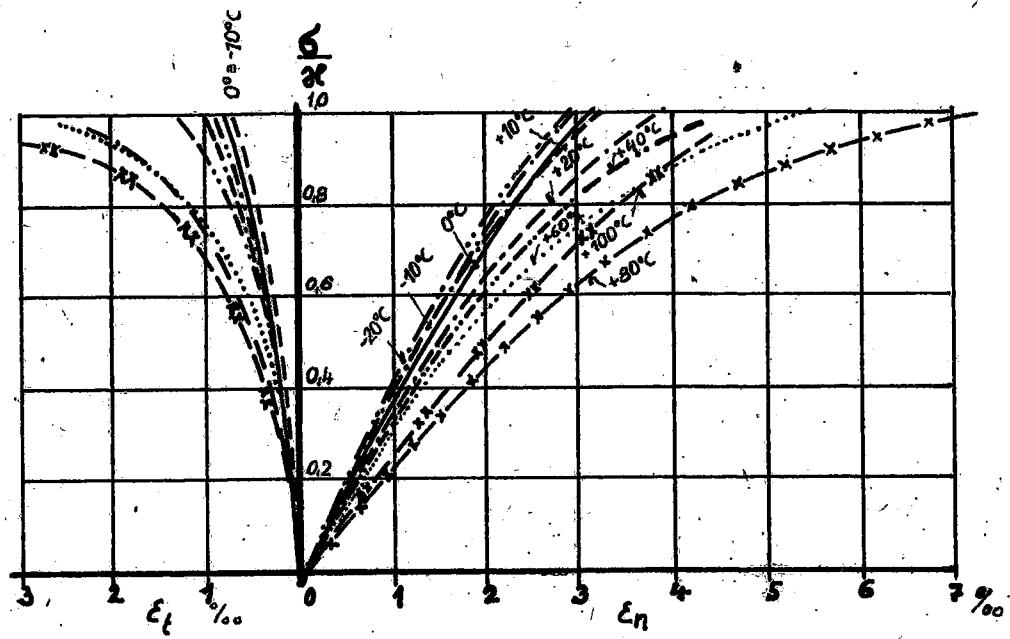
b)



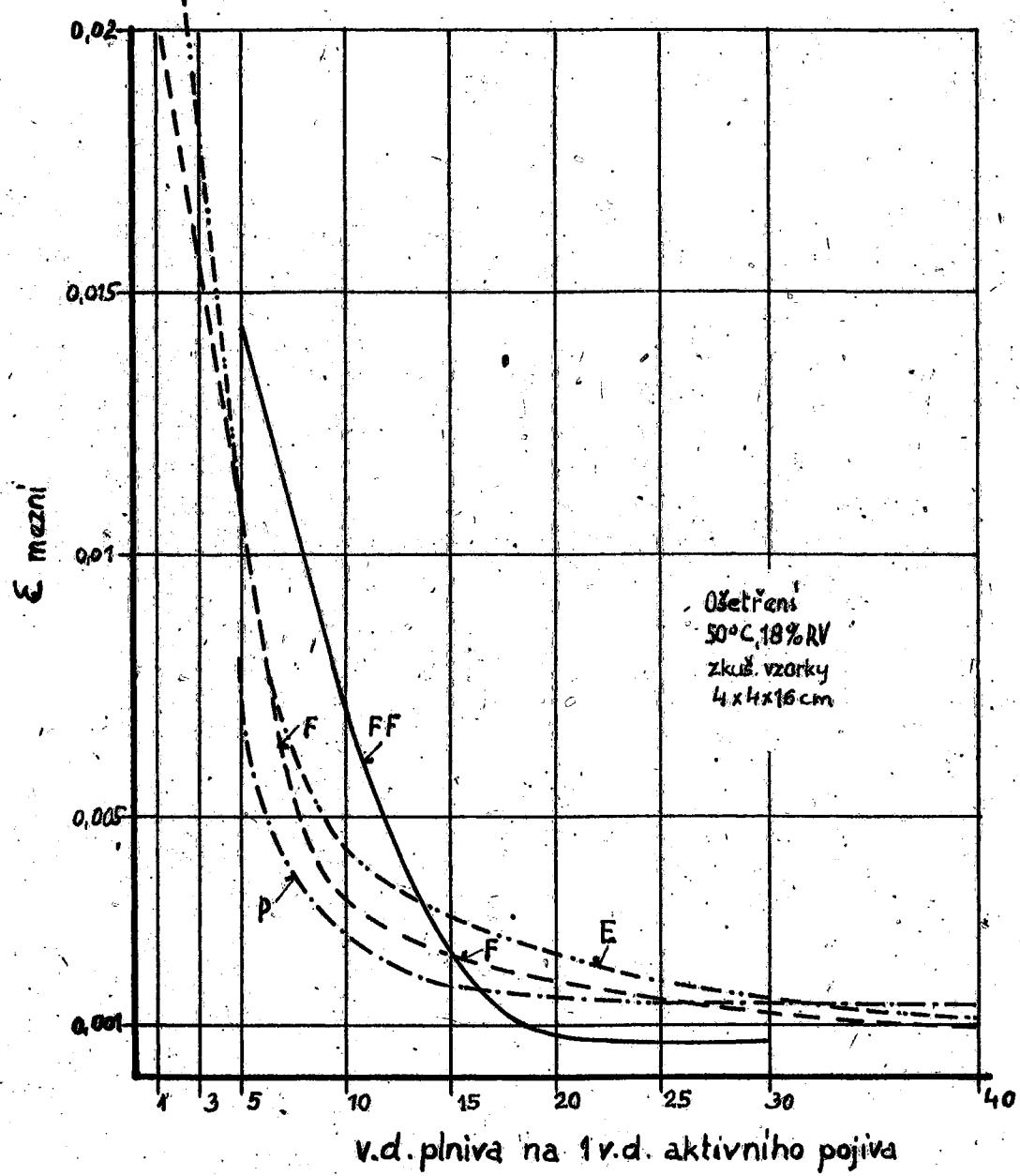
c)



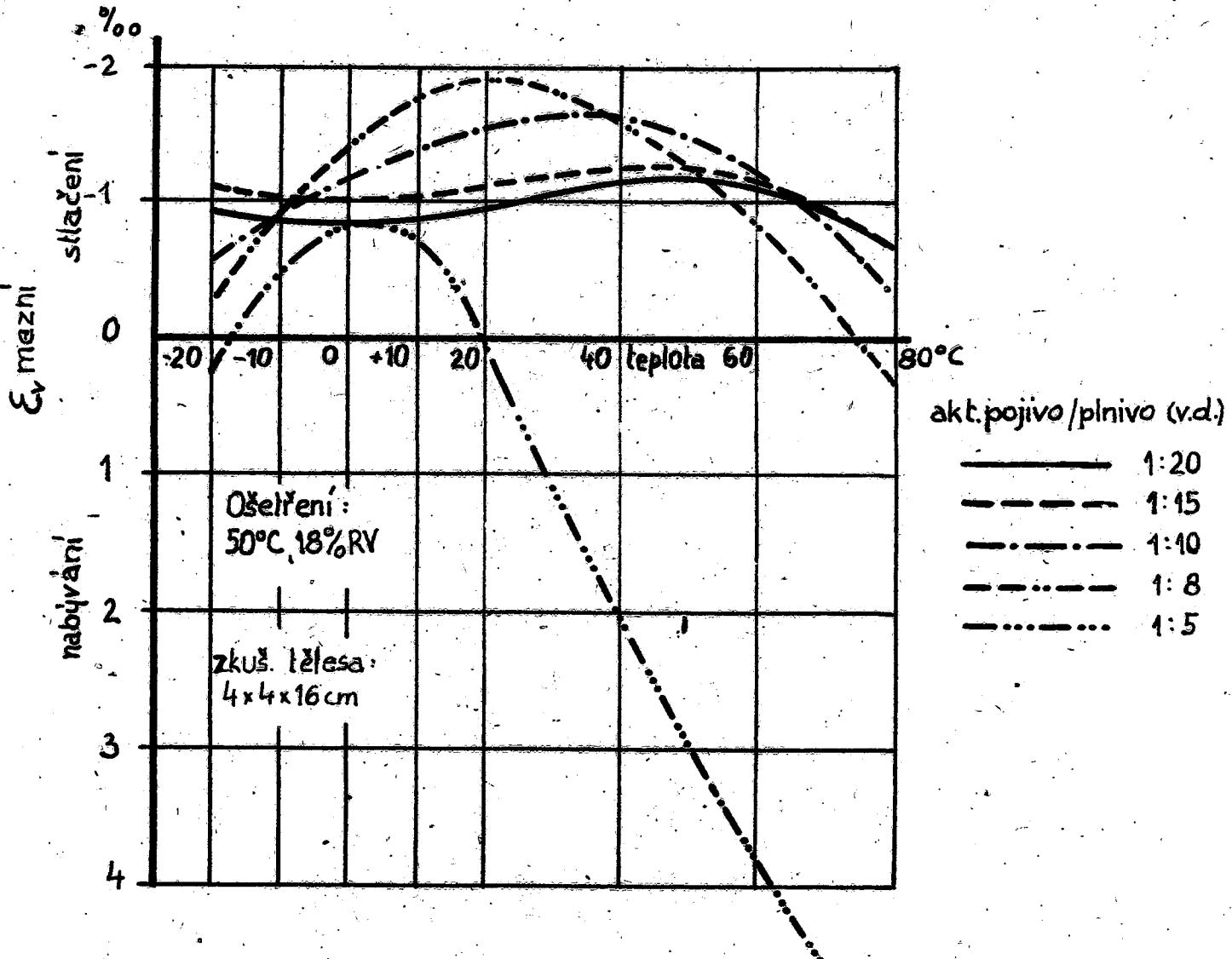




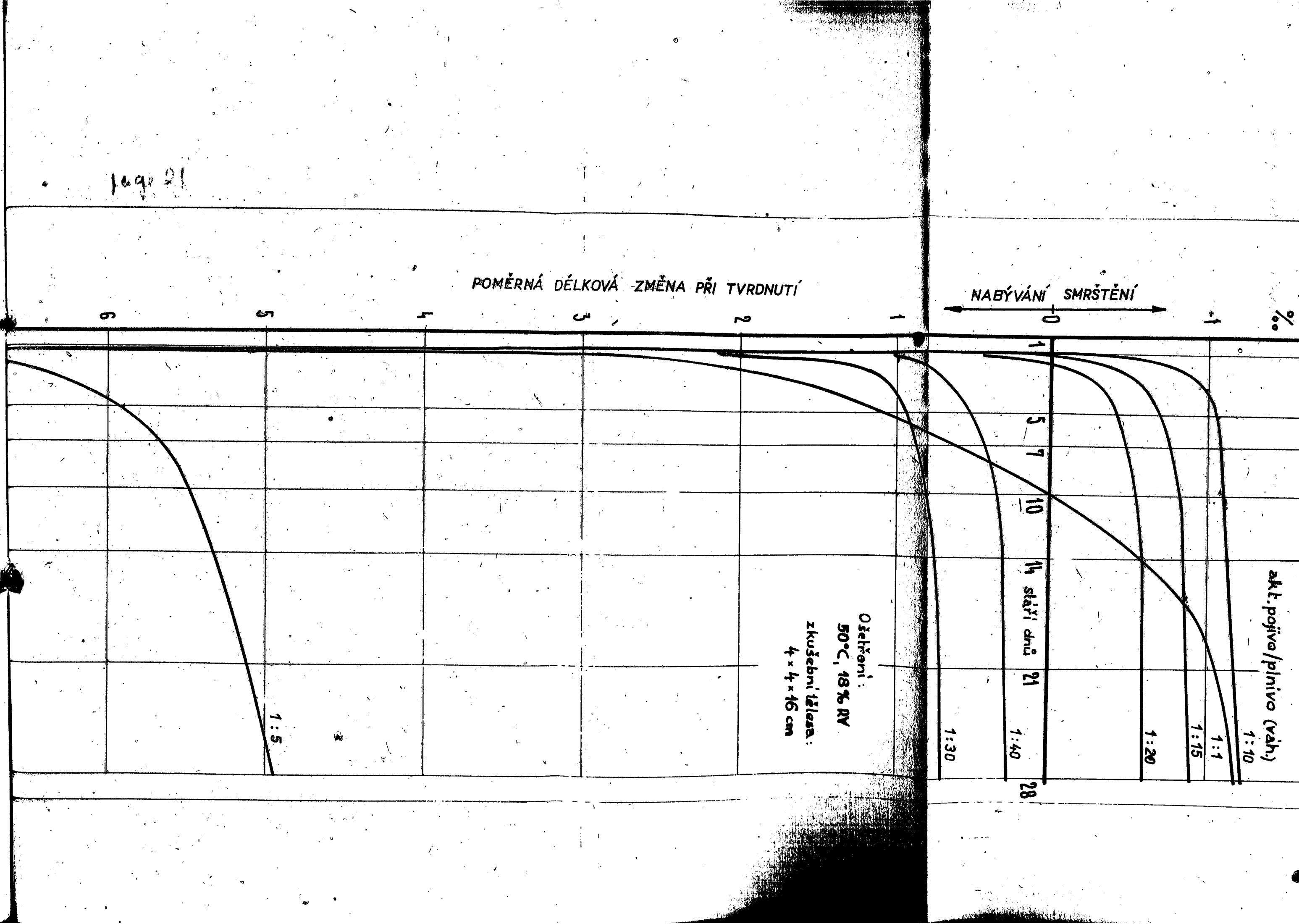
OBR. 17



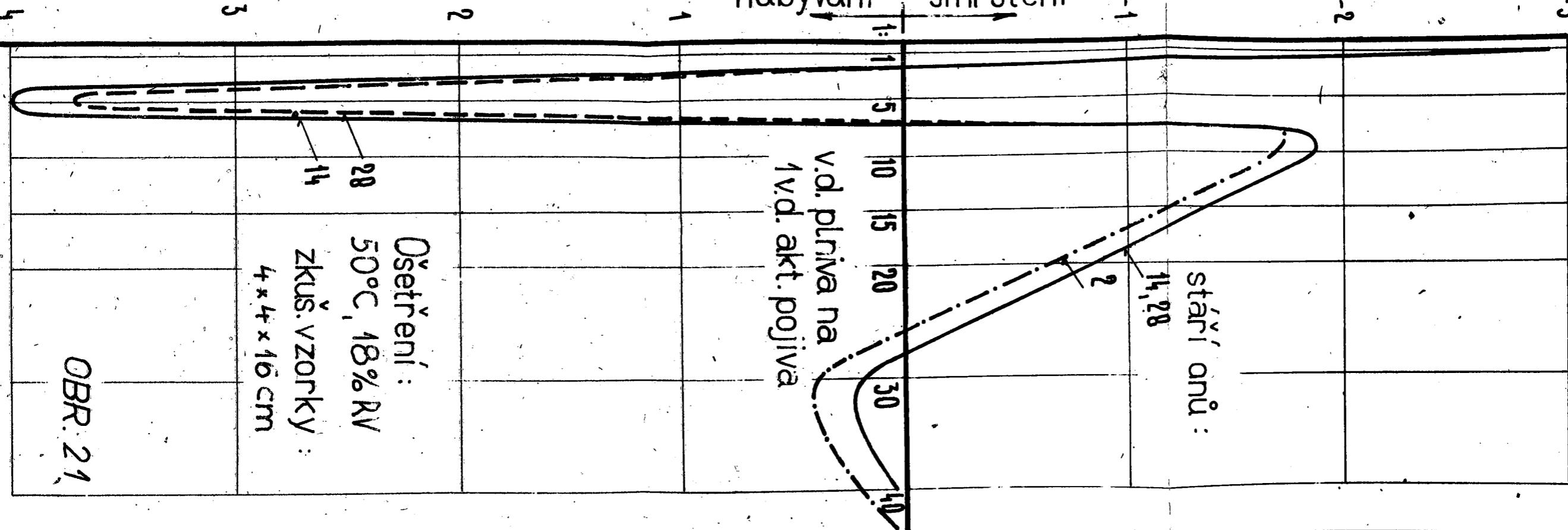
OBR. 18



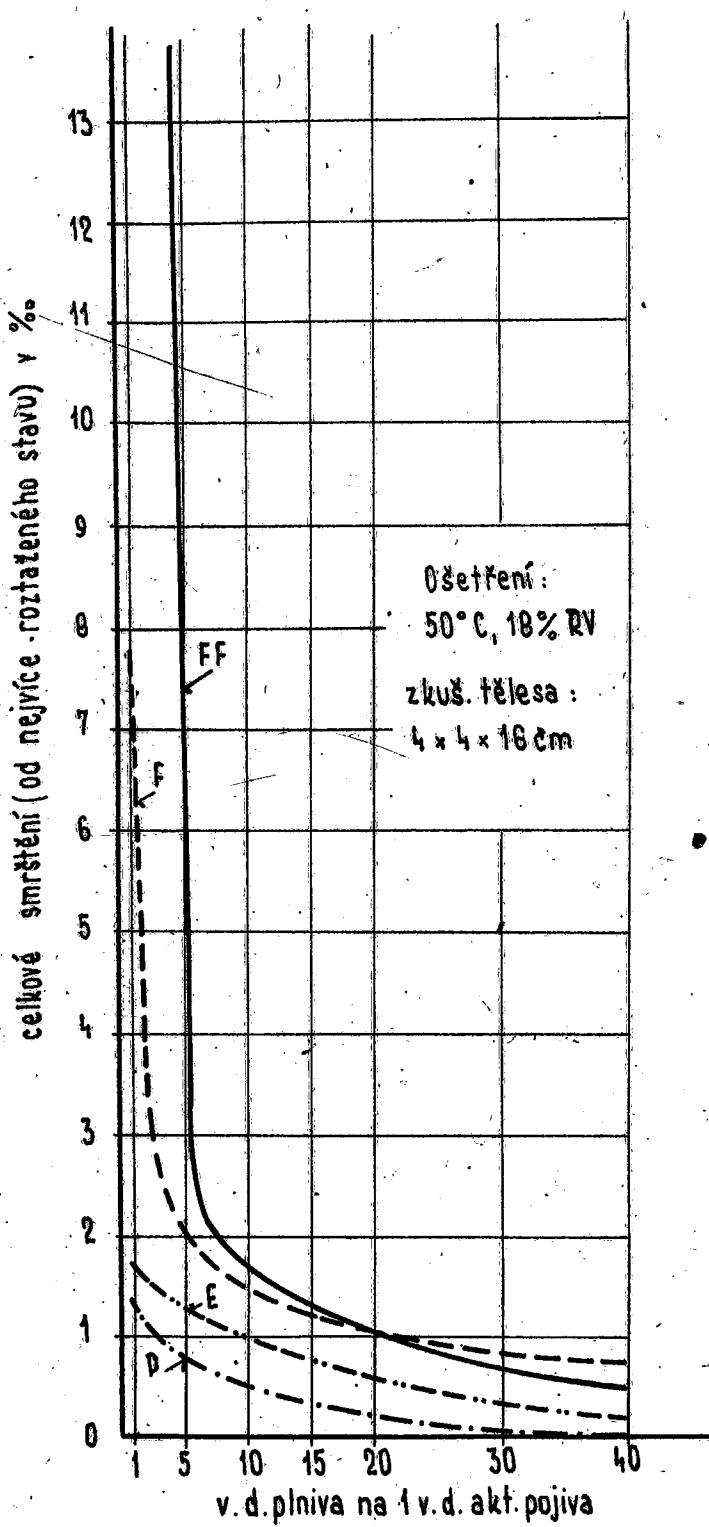
OBR. 19



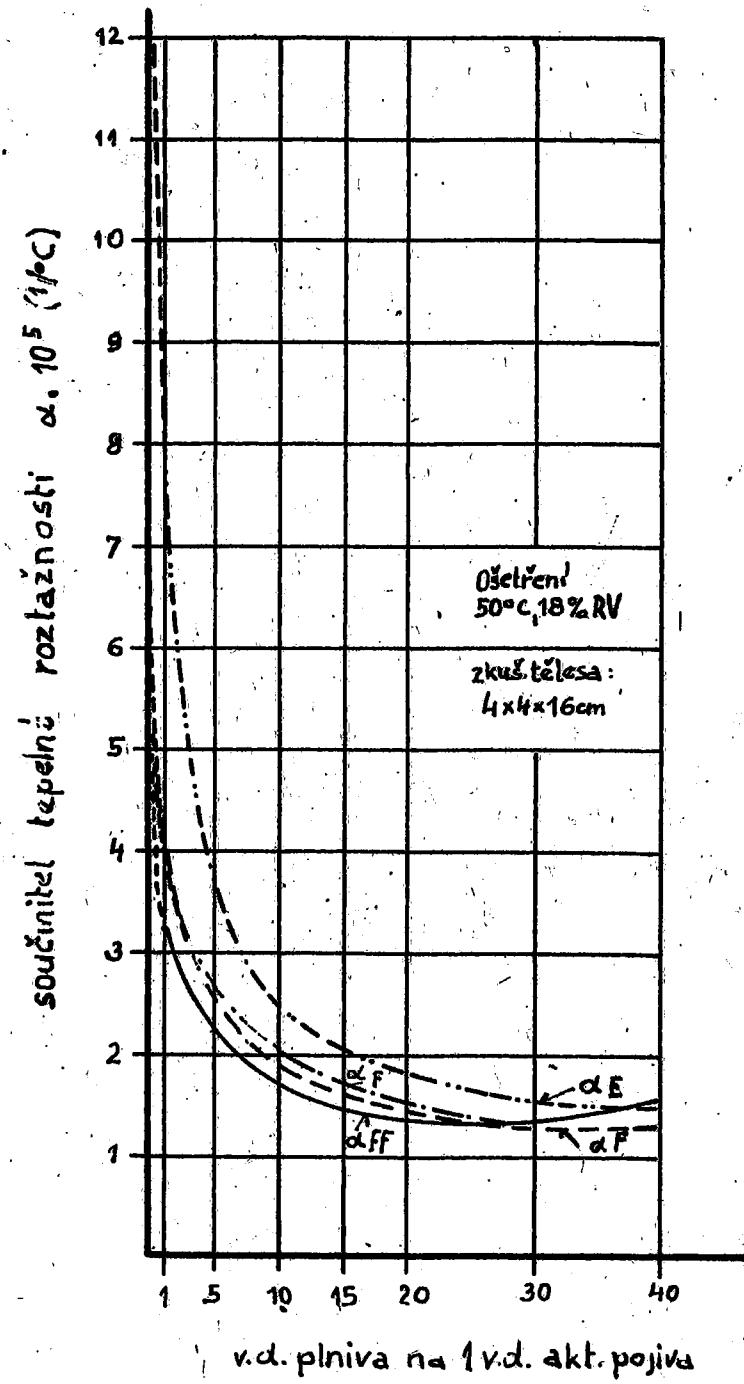
konečná poměrná délková změna při tvrdnutí (po vychladnutí)  
nabývání smrštění



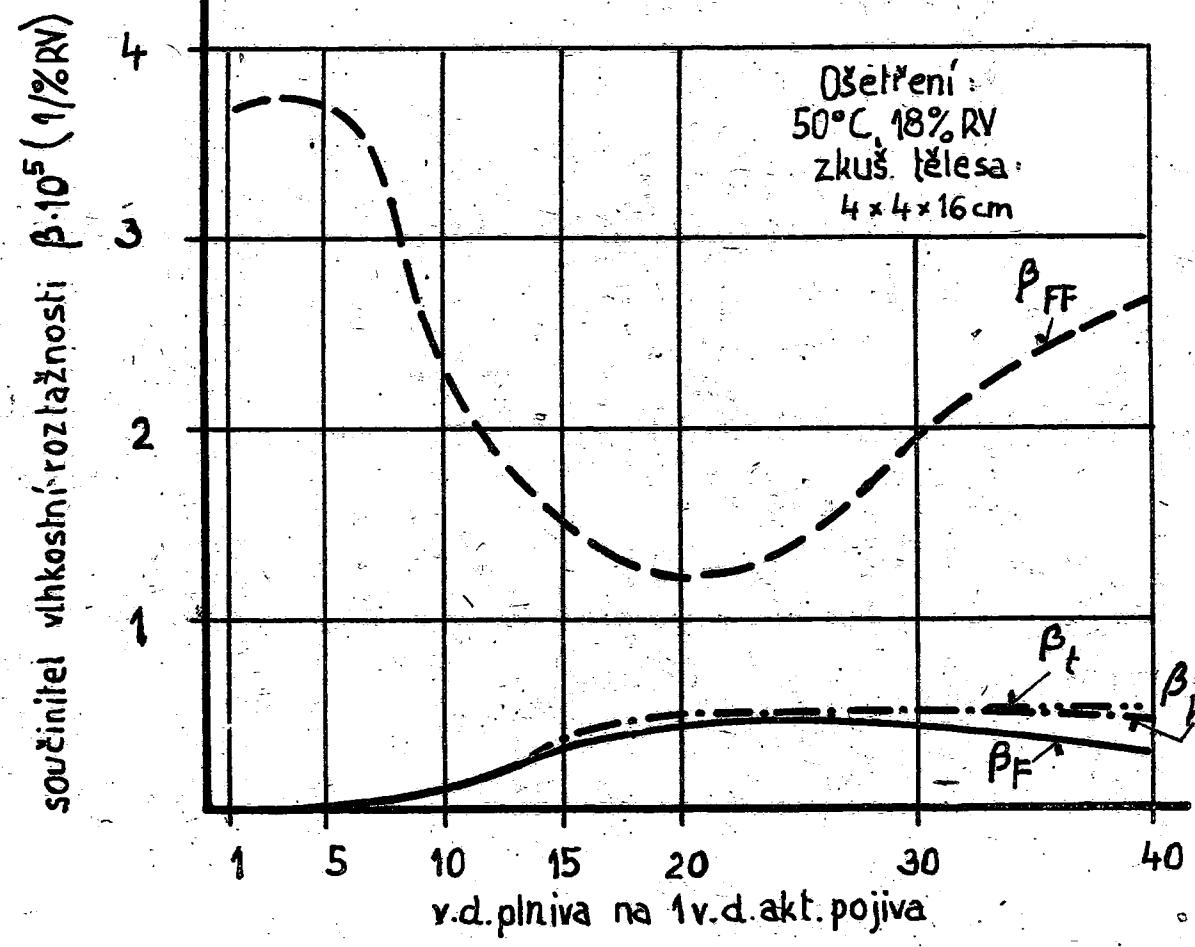
OBR. 21



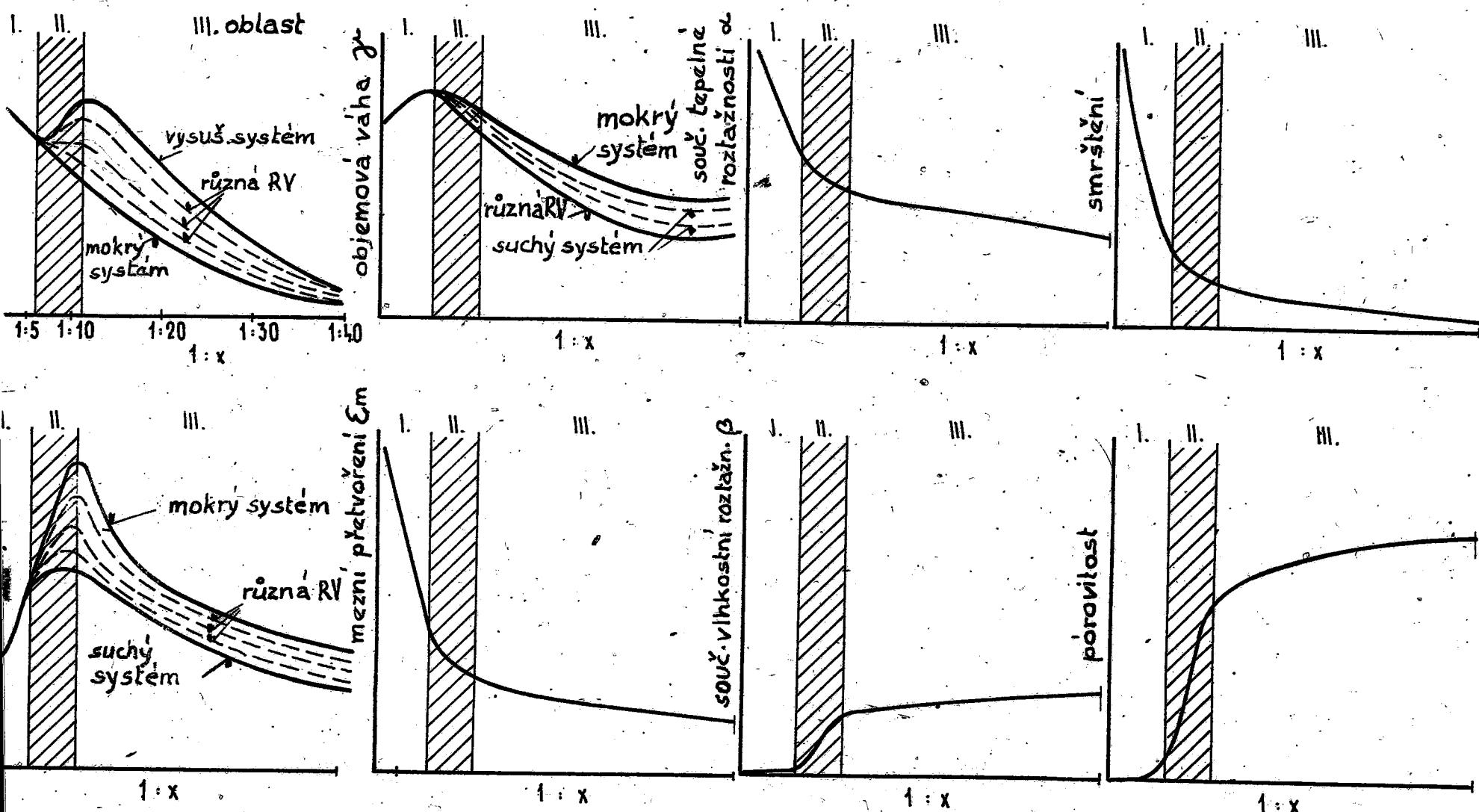
Obr. 22



OBR. 23

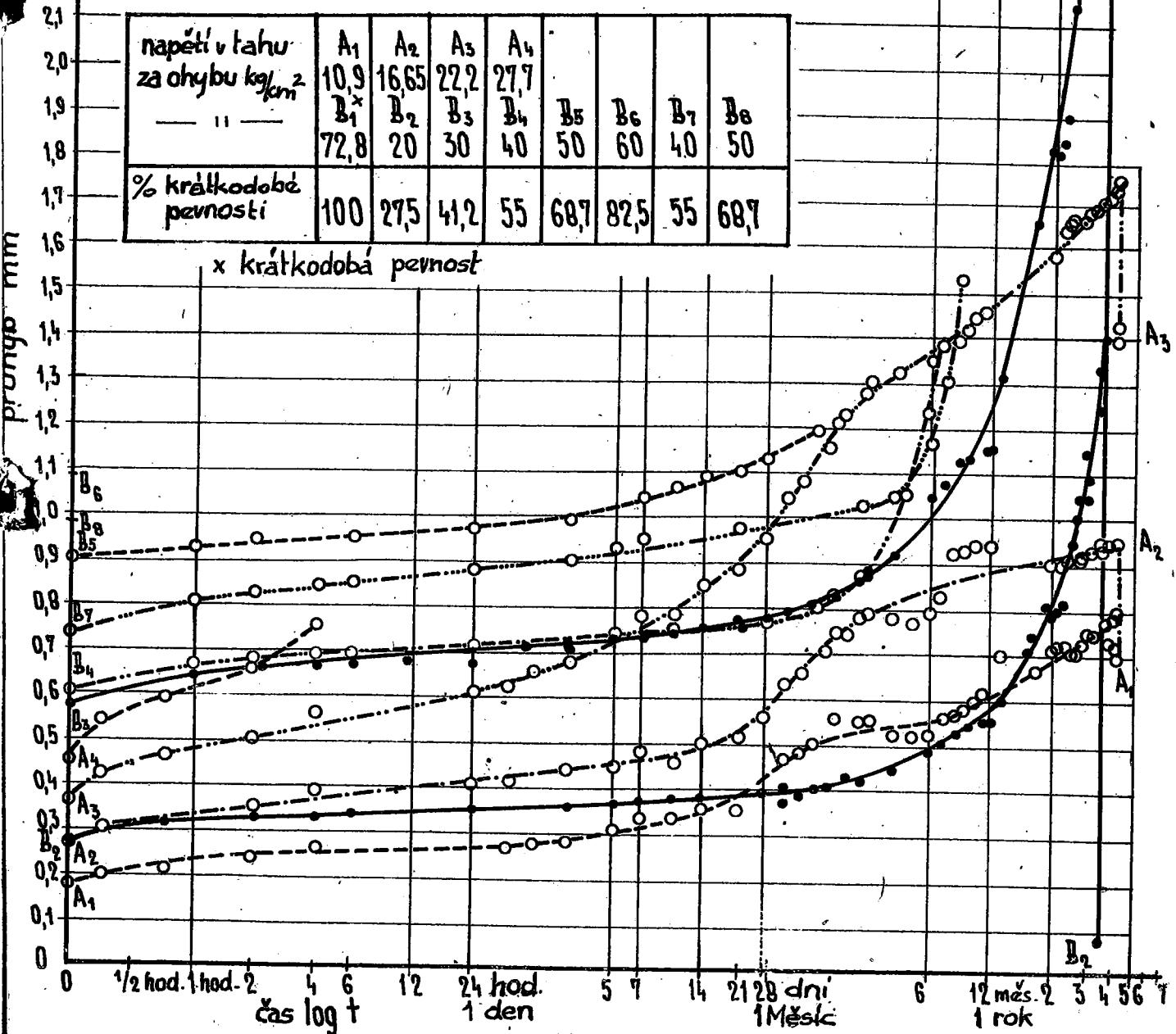


OBR. 24



OBR. 25

Složení směsi (v.d.)  
 furfurylalkohol 10  
 fural 2  
 katalysátor DM 25% 3  
 Štěrkopisek do 25mm 150  
 Ošetření:  
 14 dní při 50-60°C, -30% RV



ZMĚNA PRŮHYBŮ BEROLOVÝCH NOSNÍKŮ V ČASE

Roznožila M.L.A., Praha