

arch.
115

stavebnícky časopis

ROČNÍK 31
JANUÁR—
FEBRUÁR 1983
CENA 24 KčS

12

MESAČNÍK PRE TEORETICKÉ PROBLÉMY V STAVEBNÍCTVE



VEDA, VYDAVATELSTVO SLOVENSKEJ AKADÉMIE VIED,
814 30 BRATISLAVA, KLEMENSOVA 19, ČSSR

Stavebnícky časopis

Mesačník pre teoretické problémy v stavebníctve

Stavebnícky časopis je venovaný teoretickým problémom stavebných látok a konštrukcií. Uverejňuje pôvodné práce z oblasti mechaniky stavebných konštrukcií, teórie ich navrhovania, najmä z kovu a železobetónu, technológie a fyzikálno-chemickej mechaniky stavebných látok a stavebnej fyziky.

Строительный журнал

Ежемесячник для теоретических проблем в строительстве

Строительный журнал занимается теоретическими проблемами строительных материалов и конструкций, публикацией оригинальных статей из области механики строительных конструкций, теории их расчета и проектирования, именно что касается металлических и железобетонных конструкций, технологии и физико-химической механики строительных материалов и строительной физики.

Building Journal

Monthly for Theoretical Problems in Building and Civil Engineering

The Building Journal is devoted to theoretical problems of building materials and structures. It publishes original papers dealing with problems of structural mechanics, theory of design of metal and reinforced concrete structures, technology and physicochemical mechanics of building materials and with problems of daylighting, acoustics and thermal performance of buildings.

Stavebnícky časopis

Ústavu teoretickej a aplikovanej mechaniky Československej akadémie vied a Ústavu stavebníctva a architektúry Slovenskej akadémie vied

Vydáva VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 814 30 Bratislava

Ročník 31, 1983, č. 1—2

Adresa redakcie — Адрес редакции — Editor's Office

Ústav stavebníctva a architektúry SAV, 842 20 Bratislava, ČSSR

Redakčná rada : Hlavný redaktor a predseda : Ing. Ján Balaš, DrSc., člen korešp. ČSAV a SAV. Členovia : doc. Ing. Jozef Djubek, DrSc., prof. Ing. arch. Vladislav Dlesek, DrSc., prof. Ing. Martin Halahyja, DrSc., prof. Ing. Ján Hájek, DrSc., Ing. Jiří Hlaváček, CSc., Ing. Ivan Horák, Ing. dr. Jaromír Jambor, DrSc., Ing. Josef Jira, CSc., Ing. Vratislav Kafka, DrSc., doc. Ing. Boris Kamenov, CSc., Ing. Gustáv Martinček, DrSc., akademik Jaroslav Němec, prof. Ing. Josef Říha, DrSc., Ing. Rudolf Skrúcaný, DrSc., člen korešp. ČSAV a SAV, doc. Ing. Miroslav Škaloud, DrSc., prof. Ing. dr. Arpád Tesár, DrSc., člen korešp. SAV, Ing. Milík Tichý, DrSc.

Výkonný redaktor : Ing. Dušan Franců

Redaktorka časopisu : Margita Krajčiová

Technická redaktorka : Soňa Smoláková

Časopis vychádza dvanásťkrát do roka. Ročné predplatné 144,— Kčs. Číslo 1—2, Kčs 24,—. Rozširuje, objednávky a predplatné prijíma PNS — ÚED Bratislava, ale aj každá pošta a doručovateľ. Objednávky do zahraničia vybavuje PNS — Ústredná expedícia a dovoz tlače, 813 81 Bratislava, Gottwaldovo nám. 6. Vytlačili ZT, n. p., závod Svornosť, Bratislava.

© VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1983

ROZVOJ A PERSPEKTIVY MECHANIKY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V ÚTAVU TEORETICKÉ A APLIKOVANÉ MECHANIKY ČSAV

JAN JAVORNICKÝ, RICHARD BAREŠ¹

Článek poskytuje přehled o vývoji problematiky kompozitních materiálů v ÚTAM od počátku padesátých let a charakterizuje hlavní rysy koncepce a zaměření tohoto výzkumu, specifické pro ÚTAM v mezinárodním srovnání: kompozitní materiál jako strukturální systém, úloha vnitřního fázového rozhraní, vliv vyplnění vnitřního prostoru systému, odvození výrazů pro elastické konstanty systémů dvoufázových kompaktních a systémů s nespojitou nebo spojitou pórovitostí a tekutou fází, pojetí polykrystalických prostředí jako složených, a pojetí porušení jako mez energetické kapacity systému vyjádřenou elastancí.

Jsou uvedeny některé aplikace a realizace dosažených poznatků ve stavebních konstrukčních materiálech a prvcích a naznačeny cesty dalšího řešení problematiky.

1. Mechanika kompozitních materiálů jako nový obor mechaniky kontinua

Věda se rodí z poznatků empirie a z vyjádření těchto poznatků ve funkčních závislostech, zákonitostech, na základě přijatých hypotéz; pokud ve zpětné korelaci tyto funkční závislosti vyhovují skutečnosti v míře přesnosti, která danému účelu popisu vyhovuje, je teorie, na konstituovaných závislostech založená, přijatelná a upotřebitelná. Adekvátnost takové teorie obecnému, fyzikálnímu ději je ovšem přechodná a postupně se ztrácí se vzrůstem nových poznatků v souhlase s dialektickou zákonitostí procesu poznání.

Prvotní teorie mechaniky kontinua, v podstatě teorie pružnosti, obrážely přirozený pohled na — po výtce konstrukční — materiál jako na hmotu stejnorodou, izotropní (nejvýše s apriorním ohledem na směr namáhání jako u dřeva). Je jistě hodno uznání, že autoři této teorie ji budovali na základě poučeného přístupu a s prozíravým pohledem, vyhovovala-li v podstatě nejen v období industrializace výrobních sil, ale v mnoha směrech až do současné epochy exploatace energetických zdrojů.

Souběžně s mechanikou kontinua rozvíjela se i věda o materiálech, především kovových. Soustřeďovala se převážně na zdokonalování užitých vlastností kon-

¹ Doc. Ing. Jan Javornický, DrSc., Ing. Richard Bareš, DrSc., ÚTAM ČSAV, Vyšehradská 49, 128 49 Praha 2.

strukčních materiálů, a to jak způsobem jejich zpracování, tak i příměsemi. Toto pojetí nemění v podstatě ani zavedení cementu jako pojiva betonu; i novátorský objev železového betonu znamená z tohoto hlediska jen sprážením dvou různých materiálů vhodným způsobem, aby se ve svých mechanických vlastnostech doplňovaly.

Teprve materiály vznikající záměrným míšením různých fází dávají vznik nové třídě materiálů, kompozitům. Neznamená to, že by již v minulosti nebyly materiály tohoto charakteru používány: jsou jimi v podstatě i dřevo, slitiny, eutektika, oceli, maltoviny všeho druhu aj. To, co vytváří však novou třídu, je přístup k těmto materiálům; prvořadým záměrem je vytvořit nový materiál, splňující další, mnohdy zcela nové vlastnosti, než mají jednotlivé jeho složky.

Tento přístup se ve světě začíná objevovat nejprve ojediněle, ale zvláště s rozvojem plastů stále hojněji, takže již koncem 40. let existují materiály, které je možno za kompozitní bez rozpaků označit. K jejich pronikavému rozšíření dochází v 60. letech, v 70. a 80. letech již jejich použití v některých oborech převyšuje mnohokrát použití klasických homogenních materiálů. Tento trend, který není módní záležitostí, ale který plně odpovídá jak konstrukčním potřebám, tak i potřebě racionálního hospodaření se zdroji surovin a energie a v neposlední řadě umožňuje i řešení destrukce nebo zpracování upotřebených tovarů bez škodlivých ekologických důsledků, ukazuje nejlépe vývoj světové produkce. Omezíme-li se pro jednoduchost a nejvyšší spolehlivost podkladů jen na vlákna vyztužené plasty, měla v posledních 5 letech světová produkce průměrný roční přírůstek 10% (Japonsko 35%) při celkové produkci 2 mil. tun (1978). Při tom se na spotřebě podílí průmysl a zemědělství jednou třetinou, elektroprůmysl jednou čtvrtinou a stavebnictví zhruba jednou pětinou [1].

Je přirozené, že tento rozvoj kvalitativně nové třídy konstrukčních materiálů se musel projevit i v rozvoji teorie konstrukcí a především v rozvoji mechaniky materiálů jako jejím základě. V ÚTAM, kterému nebyla problematika materiálů v důsledku vkladu, kterého se mu dostalo při zrodu, cizí, byl tento trend zachycen poměrně záhy a již koncem padesátých let byl rozpracován výzkum nových typů kompozitních materiálů s granulárním plnivem pro uplatnění ve stavebnictví. Na tehdejší dobu velmi dobrá experimentální základna pro analýzu napětí a deformací, zaměřená progresivně na problematiku analýzy detailů kontinua, vytvářela další základ pro cílený přechod k výzkumu mechaniky struktur. Proto mohl být již počátkem šedesátých let podán program výzkumu složených materiálů, který předstihoval svou dobu obecným pojetím a umožňoval upevnit nástup čs. vědy k řešení problematiky složených materiálů a využití jeho výsledků na jednom z předních míst světového úsilí. V širší míře, ale koncepčně nesoustředěně byl tento výzkum veden pouze v USA a záměr domácí cesty se opíral o předpoklad využití možnosti socialistického řízení vědy, o koordinaci potřebných sil a prostředků.

I když bylo v ÚTAM v r. 1963 založeno oddělení mechaniky nehomogenních

prostředí, a tak význam nového směru částečně pochopen, do výzkumného plánu byly zařazeny pouze některé dílčí otázky kompozit, pro které zbývala jen malá pracovní kapacita a nedostatečné experimentální vybavení.

Nicméně přes tyto nepříznivé podmínky bylo v ÚTAM dosaženo špičkových výsledků, i když jen v některých dílčích problémech, a zachoval si dosud nepřekonané postavení v základním pojetí složených materiálů jako soustav fází, nabývajících ve vytvořeném systému nových kvalit, který dochází ve světě stále většího uznání a více následovníků.

Příznivý obrat znamená vytvoření stěžejního směru věnovanému kompozitům v 7. pětiletém státním plánu základního výzkumu a mj. hlavního úkolu, zaměřeného na kompozitní materiály s makromolekulární maticí, jehož nositelem je ÚTAM. Vytváří se tak základ pro komplexní výzkum této materiálové třídy a potvrzuje se význam těchto materiálů pro společenskou praxi a potřeba prioritního výzkumu problémů jejich přetváření a porušování jako základ pro jakékoli konstrukční uplatnění [4].

2. Principy mechaniky kompozitních materiálů

Souvislost mechaniky kontinua a mechaniky kompozitních materiálů není bezprostřední. Mechanika homogenního kontinua operuje elementem prostředí, jehož izotropní chování umožňuje uvažovat probíhající přetvárné procesy za rovnovážné a spojité v každém diferenciálu času, a v důsledku toho obecně za deterministické. Mechanice materiálů je tento přístup neadekvátní a řešení jejich problémů klasickým přístupem se nutně dostávalo a dostává do rozporu se skutečností a výsledky mohou být brány v úvahu jen jako více či méně přibližné. I tato přibližnost je však selhávající, jedná-li se o problémy porušení, o pevnost a životnost materiálů a prvků z nich vyrobených.

Mechanika kompozitních materiálů je zpřesněním či spíše základem mechaniky materiálů vůbec. Také jejím objektem je kontinuum — nebo v dalším pohledu omezené těleso — avšak kontinuum jako systém částic pevných a tekutých. Na částicích pevných stejně jako částicích tekutých se obvykle podílí více fází²; uspořádání fází charakterizuje strukturu systému.

Přístup ÚTAM k řešení přetvoření a porušení kompozitních materiálů (a materiálů vůbec) vychází z uvažování jejich strukturnosti jako principu určujícího veškeré vlastnosti a děje v nich. Při tom nejde jen o sumaci vlastností jednotlivých fází a jejich intenzitní zastoupení v ději, ale o skutečnost, že *strukturní systém* nabývá vlastností nových, které z vlastností jednotlivých složek nemohou být

² Užívá se terminologie mechaniky kompozitů. Fáze je každá homogenní součást hmotného prostředí, fyzikálně oddělená od ostatních jeho koexistujících součástí. Jinak o terminologii viz [5].

odvozeny [3]. Proto nemůže vystihnout chování kompozitu pojetí obvyklé dosud v mikromechanice, které obdobně jako v homogenním kontinuu definuje jeho infinitezimální element, nadaný jistými vlastnostmi jeho fází. Ověření této z počátku hypotézy bylo prvním cílem výzkumné práce v ÚTAM. Výsledky prováděné vesměs na plastbetonech, jichž plnivové a pojivové fáze mají pronikavě rozdílné vlastnosti a jsou pro daný účel nad jiné výhodné, potvrdily obecnou platnost této hypotézy nejen pro makrodispersní systémy, ale i pro vláknité, kde ovšem je nutno přihlížet i k orientaci textury.

Výsledky tohoto zaměření a výzkumů řešících další otázky mechaniky strukturálních systémů umožnily navíc položit základ ke *klasifikaci kompozitů jako nové třídy materiálů* [2]. Je dána definicí čtyř základních typů (ohrazených pěti mezními systémy) charakterizovaných intervaly relativního objemového zastoupení matrice a dispergované fáze, ve které se přihlíží též k zastoupení jak pevné, tak tekuté fáze. Zatímco první typ (plněná pojiva) představuje materiály se segregovanou plnivovou fází a čtvrtý typ aglomerovanou plninovou fází s tekutou matricí, jsou konstrukčně nejvýznamnější — při nejmenším pro své vynikající mechanické vlastnosti — typ druhý, kde agregované plnivo je dispergováno v matrici o objemu menším, než celý zbývající vnitřní prostor kompozitu, takže vzniká nespojitá porozita většinou s účastí tekuté fáze v těchto volných prostorách, a třetí, kde úbytek matrice je takový, že může vzniknout spojitá pórovitost systému vesměs s účastí tekuté fáze; druhý a třetí typ lze výstižně společně označovat jako pojená plniva.

V analýze strukturálního systému šel však řešitelský kolektiv ještě dále a vytyčil jako klíčový parametr pro vlastnosti i přetvárné procesy v kompozitech *vnitřní povrch systému*. Nejen výzkumy porušení kompozitů, ale i jejich přetváření a určujících vlastností tohoto přetváření ukázaly rozhodující roli vnitřního rozhraní mezi jednotlivými fázemi. Na rozdíl mezi strukturou matric na rozhraní a v kompaktu poukázaly již naše fotoelasticimetrické studie, které vedly k prvním závěrům o charakteru hmotových a mechanických sil na vnitřním povrchu kompozitu [6] a které jsou postupně potvrzovány i chemicko-fyzikálními výzkumy [7]. Vnitřní povrch systému jako geometrická veličina nemůže však vystihnout celou povahu složitých vlastností hmoty, které se v oblasti rozhraní vytvářejí a které se pak na přetvárném nebo destrukčním procesu účastní s různou intenzitou. K definování vnitřního povrchu s jeho fyzikálními a chemickými vlivy nám chybí dosud mnoho poznatků chemické fyziky, ale i mechaniky kompozit. Naukou, která se důsledně snaží zahrnout fyzikální a chemické děje do svých mechanických úvah, je fyzikálně-chemická mechanika, která však dosud soustředila svou pozornost spíše na pohyb koloidů než na pohyby v pevném systému. Pojetí vnitřního povrchu v řešení problémů chápe ÚTAM v probíhající vývojové etapě teorie kompozitů jako kvantitu, jejíž vlastnosti lze popsat v dimensích veličin ve fyzice používaných a operovat s ní v mechanických úvahách jako geometricky fyzikálně-chemickým

parametrem. Zatím tento přístup uplatňuje důsledně při řešení kubicky krystalických struktur.

Souvislost relativního objemu plniva a pojiva s výslednými vlastnostmi kompozitu vede na problém *vyplnění prostoru*. Vytvořit agregovaný systém předepsaného objemového zastoupení fází při co nejmenším vnitřním povrchu by znamenalo získat kompozit vynikajících mechanických vlastností. Na druhé straně má řešení tohoto problému význam pro posouzení změn vlastností kompozitu na volných površích v důsledku tzv. stěnového účinku. Proto byly rovněž této otázce věnovány studie uvažující v první etapě jen regulární systémy s homodimensionálními prvky. Pro nedostatečné počítačové vybavení se nemohlo v tomto směru zatím pokračovat, právě tak jako ve výzkumech vztahů mezi stereologickými měřeními a odpovídajícími situacemi na modelových systémech. Avšak alespoň poznatky o stěnovém účinku byly s dobrou přibližností kvantitativně vyjádřeny a uplatněny [8].

Proces deformování strukturního systému není tedy zřejmě integrací deformování idealizovaných infinitezimálních prvků složeného kontinua, i když jejich kompatibilita zůstává zachována. Avšak k řešení deformačního procesu adekvátním způsobem chybí zatím vhodný aparát analytické mechaniky. Nezbyvá, než alespoň pro přechodnou dobu se spokojit pro řešení přiměřených problémů aparátem přibližným, stávajícím [9]. Ten se opírá o dvě elastické materiálové konstanty. Řešení *stavů napětí a přetvoření*, které bylo v ÚTAM navrženo, vychází tedy též z těchto konstant, Youngova modulu pružnosti a Poissonova poměru, avšak snaží se v nich respektovat rozhodující skutečnosti kompozitního systému, tj. účast jednotlivých fází a vnitřní povrch. Tyto podmínky vstupují do řešení prostřednictvím idealizovaného modelu systému, ve kterém plnivo reprezentuje pevný skelet, jeho povrch odpovídá průměrnému vnitřnímu povrchu systému a jeho objem relativnímu zastoupení plniva v systému. Je patrné, že je tím dána možnost respektovat i tekutou fázi v systému, nejen jejím modulem pružnosti, ale i velikostí vnitřního povrchu, na který se váže. Použitím takového modelu byly odvozeny vzorce pro moduly pružnosti a Poissonovy poměry kompozitů typu plněné pojivo, ale i typu pojené plnivo, tedy i porézní, a to nejen v „suchém“ stavu, ale i pro spojitou pórovitost s póry vyplněnými kapalinou (vodou) [2]. Takto určené elastické konstanty systému jsou dosud nejdokonalejším řešením, které nemá zapotřebí dosazování empirických hodnot z testovacích pokusů.

Bylo již řečeno, že aplikování klasické mechaniky kontinua na řešení strukturních systémů neodpovídá skutečnosti. Důvodem nejsou jen konečné rozměry plnivové fáze, ale i charakter vnitřní reakce na vnější namáhání. Představa napětí a relativní deformace, kterou mechanika kontinua operuje, nenalézá zde svou principiální odezvu. Vnější namáhání se nedistribuuje homogenně, ba ani ne vždy spojitě, ale vyvolává *silové toky* a posunutí. Tuto skutečnost názorně dokumentoval výzkum vnitřní napjatosti modelu, šachovnicově skládající pole tuhých

a poddajných trámek v uspořádání s konstantním napětím a s konstantním přetvořením [10]. Vnitřní reakce se soustřeďuje do optimálně uložených tuhých trámek, vytváří silový tok směřující do podpor, a v systému vznikají i oblasti zcela nezátížené. Obdobnou skutečnost interpretují i fotoelastické modely s inkluzemi, vyšetřované s cílem přinést informaci o způsobu namáhání můstek mezi jednotlivými inkluzemi [11].

Respektování úlohy vnitřního povrchu při přetváření bylo uplatněno při budování teorie napětí a porušení *polykrystalických struktur*. Rozhraní podél krystalových hran je zde chápáno jako fáze matricová a jádra krystalických zrn představují plnivo. Na tomto modelu vybudovaná teorie [12] nejen vystihuje přesněji distribuci napětí v kovových (zatím monofázových) polykrystalech, ale umožňuje i postihnout významné skutečnosti pro posuzování iniciace a propagace porušení a mj. i skutečnost relativního pootočení jednotlivých zrn vlivem vznikajících momentových napětí podél krystalových hranic.

Problematika *dlouhodobého přetváření* se v ÚTAM soustřeďovala na systémy laminární s vazkopružnou maticí, aplikované jako technické textilie.

Cílem prvních prací bylo stanovit mezní stavy kompozitních materiálů, tvořených vlákny (tkaninami) jako nosným materiálem a různými druhy ochranných nánosů, které vytvářejí povrchové vrstvy vystavené vlivu atmosféry. Pozornost byla soustředěna zejména na stanovení krátkodobé pevnosti v tahu v závislosti na orientaci os materiálové symetrie vůči směru působícího tahového napětí, dále na reologické vlastnosti (tenzory vazkopružné relaxace a poddajnosti), které byly měřeny při vyvození stavu homogenní rovinné napjatosti nebo rovinné homogenní deformace [13, 14].

Při zpracování experimentálních výsledků byl východiskem předpoklad, že hodnocené kompozitní systémy je možno v oblasti aplikačních úrovní napětí a deformací považovat za kvazi homogenní lineárně (i nelineárně) vazkopružné materiály. Pro tyto modely byly odvozeny konstitutivní rovnice, mající obecnější platnost a využitelnost i pro jiné než experimentálně hodnocené materiály.

Pro řešení otázek *porušení* kompozitních systémů byly zatím sledovány jen dílčí problémy, především rozložení koncentrace napětí v systému a zvláště distribuce smykových napětí, především na kontaktní ploše fází. Dosud chybí mnoho poznatků k tomu, aby mohl být i v tomto směru uplatněn přístup, který ÚTAM vytyčil [2] a který se opírá o distribuci a transformaci vnitřní energie namáhaného strukturního systému. V zásadě jde o přístup termodynamický, který ale pro otevřené systémy, jakými kompozity jsou, nebyl obecně vypracován. Modelovým krokem v tomto směru, který však by v řadě technických požadavků vyhověl, je navržená definice tzv. elastance, veličiny reprezentující celkovou mechanickou i tepelnou energii, kterou může nejslabší místo strukturního systému akumulovat v procesu historie přetváření a reakce na vnější zatížení, aniž by došlo k porušení. K funkčnímu vyjádření této veličiny se však dosud nedospělo.

3. Realizace výsledků výzkumu kompozitních materiálů

Základní výzkum kompozitů, poznání vzájemné interakce složek a vlivu struktury systému na jeho výsledné chování umožnily úspěšnou realizaci řady kompozitních materiálů ve stavební praxi a dávají podněty pro jejich další zasvěcené a inteligentní aplikace.

3.1. Polymercementové směsi

Vhodným složením vodných dispersí polymerů jako přísady do cementové malty a betonu podařilo se odstranit některé dosavadní nevýhody polymercementových směsí (velké smrštění, citlivost k vlhkosti, nekompatibilita s cementovým pojivem atd.) tak, že mohly být úspěšně aplikovány na velkých plochách a moderní, vysoce produktivní technologii — tlakovým stříkáním.

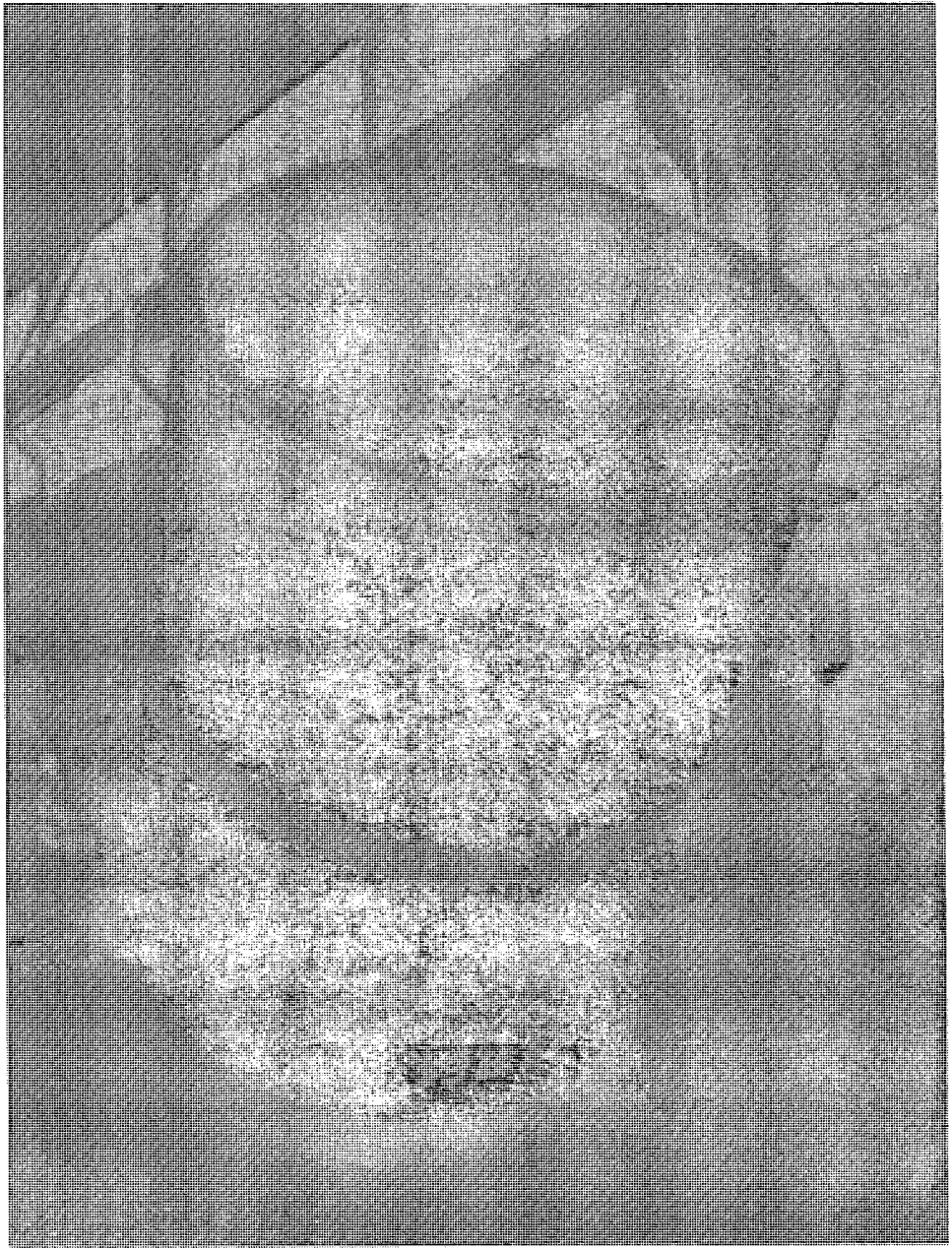
Tímto způsobem byla úspěšně upravena řada železobetonových konstrukcí narušených požárem (např. bunkry na uhlí Třinec, železobetonový skelet výrobní budovy Frýdlant v Č.) nebo stovky m² železobetonových stropních konstrukcí narušených agresivními vlivy prostředí (chemické a textilní provozy) tak, že mohou dále dlouhodobě sloužit svému účelu. Výhodně byla použita polymercementová malta s ohledem na její značně zvýšenou odolnost mechanickému opotřebení pro dráhu čerčícího zařízení nádrží na kapaliny nebo na výstavbu částečně prefabrikovaných sil na rudu.

Dále byly sledovány různé druhy vertikálních ochranných vrstev (omítek) na bázi nebo s příměsí termoplastických disperzí a objasněny jejich fyzikální a chemické interakce s podkladem při dlouhodobém působení. Na základě těchto vyšetřování byly vytyčeny směrnice pro návrh a provádění takových povrchů, vyhovujících i dlouhodobé expozici vnějšního prostředí.

3.2. Technické textilie nánosované termoplasty (jako konstrukční materiály)

Na systémech s plátěnou vazbou PES, POP, PAD a maticí PVC, PUR, případně chloroprenovou tuzemské výroby bylo vyšetřováno creepové a relaxační chování za dvouosé napjatosti v časovém intervalu 300 hodin a pevnostní chování včetně mezního porušení jednotlivých složek. Výsledky byly uplatněny při projektování aplikace asfaltových hydroizolací ve stavebnictví a při inovaci výroby technických textilií ve výzkumném ústavu VÚLV v Šumperku.

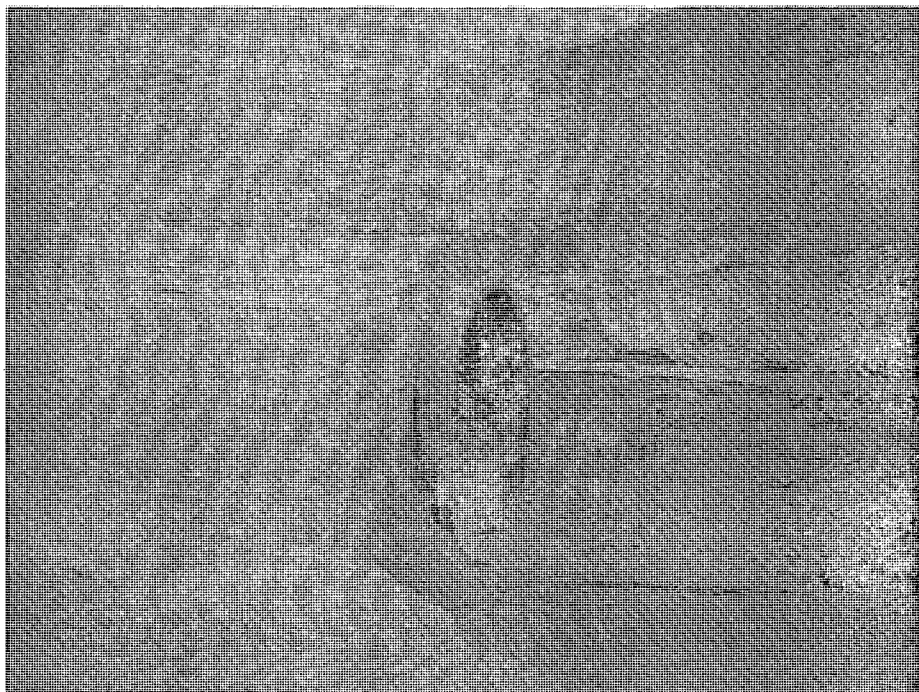
Díky jedinečným vlastnostem textilií a rozmanitosti druhů, ve kterých mohou být vyráběny, se předpokládá, že jejich použití jako výztužných elementů kompozitních systémů dále poroste. Jejich velikou výhodou je tvarová přizpůsobivost a dále skutečnost, že mohou mít charakteristiky podle potřeby designera. Velká budoucnost se v tomto směru předpokládá u hybridních textilií vytvořených ze



Obr. 1. Výroba trubních jader z furanového plastbetonu.

Рис. 1. Производство облицовок труб из фуранового пластбетона.

Fig. 1. Production of tube cores of furanic resin concrete.



Obr. 2. Stoka pro odpadní vody z chemických provozů z obetonovaných jader \varnothing 140 cm z furanového plastbetonu.

Рис. 2. Коллектор промышленных вод предприятий химической промышленности из облицованных ядер диаметром 140 см из фуранового пластбетона.

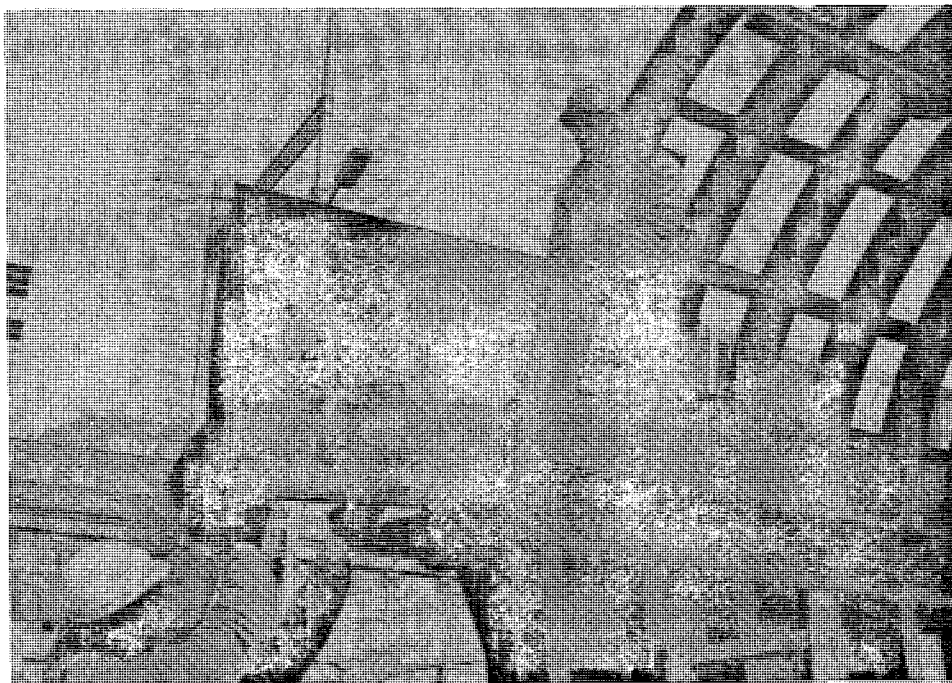
Fig. 2. Industrial wastes sewer consisting of concrete wrapped 140 cm diameter tubes of furanic resin concrete.

systemů vláken o různých modulech, které mohou sloužit i jako cenově efektivní výztuž kompozitů nedaleké budoucnosti.

3.3. Termosetické systémy pro pěší komunikace

Velký, mnohdy živelný rozvoj aplikace plastů, zejména termosetických polymerů, pro vytváření bezesparých povrchů pochůzných horizontálních ploch, vedl, jak jinak nemůže ani být, k řadě neúspěchů. Podrobnou analýzou různých poruch takových polymerních kompozitů, ať již vyztužených granulárním nebo fibrilárním plnivem, konfrontovanou se základními poznatky o strukturních systémech tohoto typu, bylo dosaženo objasnění příčin poruch a navrženy metody, jak jim předejít [15—18].

Bylo poukázáno, že jedním z hlavních předpokladů úspěšné aplikace bezespa-



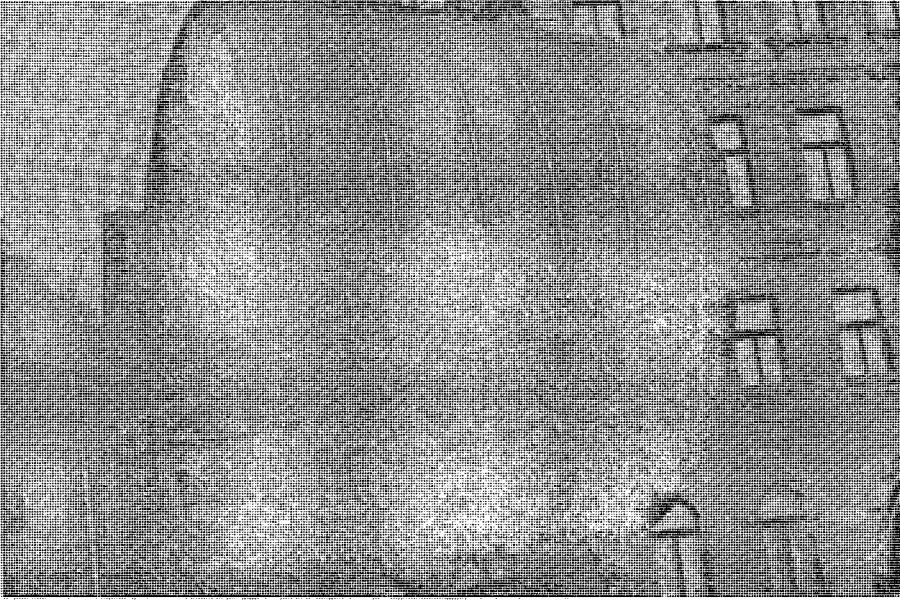
Obr. 3. Ukládání segmentů z furanového plastbetonu na ocelové koše pro výstavbu kanalizační stoky.

Рис. 3. Укладка сегментов из фуранового пластбетона на стальные каркасы для строительства коллектора.

Fig. 3. Placing sectors of furanic resin concrete on steel cages for sewer construction.

rých podlahovin je úprava podložky a celého podkladu. Poruchy lze rozdělit na tři hlavní skupiny: fyzikální [19], chemické [18] a mikrobiologické [18]. Z nich nejčastější jsou poruchy chemické (např. hydrolýza nebo oxidace), vyplývající z nevhodné aplikace surovin pro daný případ a technologických chyb, způsobených většinou nedostatečným strojním vybavením. I když systémy tohoto druhu jsou značně adaptabilní, nebo možná právě proto, není je možno používat univerzálně a je vždy nezbytné splnit především podmínky dokonalé polymerace a maximální konverze.

Byl vypracován technologický předpis pro polyesterové i epoxidové systémy včetně způsobů přípravy podkladu a jeho hodnocení i hodnocení hotového povrchu. Vypracované pokyny pro užití epoxidových pryskyřic umožňují bez rizika provádět nejen bezesparé povrchy, ale i opravy a rekonstrukce různého druhu, jako opravy a injektáže trhlin, vysrávky ulámaných okrajů, protikluzné a protismykové ochranné povlaky, ochranné membrány proti vlhkosti, lepení různých materiálů, horizontální značky atd. Pokyny pro užití polyesterových systémů na



Obr. 4. Transport trub \varnothing 360 cm složených ze segmentů z furanového plastbetonu do štoly nebo výkopu.

Рис. 4. Транспорт труб диаметром 360 см в штолью или траншею, состоящих из сегментов из фуранового пластбетона.

Fig. 4. Transportation of 360 cm diameter tubes composed of furanic resin concrete into temporary galleries or ditches.

povrchy poskytují podklad nejen pro jejich bezrizikové provádění, ale i způsob nápravy při vzniku poruch různého druhu.

Jiným příkladem úspěšné aplikace teoretických poznatků o spolupráci jednotlivých složek v konkrétním systému je podlahovina odolná extrémním požadavkům teplotním ($-40\text{ °C} \div 80\text{ °C}$), chemickým vlivům, obrusu a značným deformacím podkladu. Kromě kompozice hlavní nosné vrstvy byla navržena i kompozice celého systému, využívající příznivého vlivu tzv. transponentní vrstvy, umožňující časové vyrovnání deformací bez porušení.

Bylo dosaženo i příznivých výsledků při návrhu ochranných nátěrů na betonové hydrokonstrukce na bázi epoxi-akrylátové kompozice [20].

3.4. Plastbetony

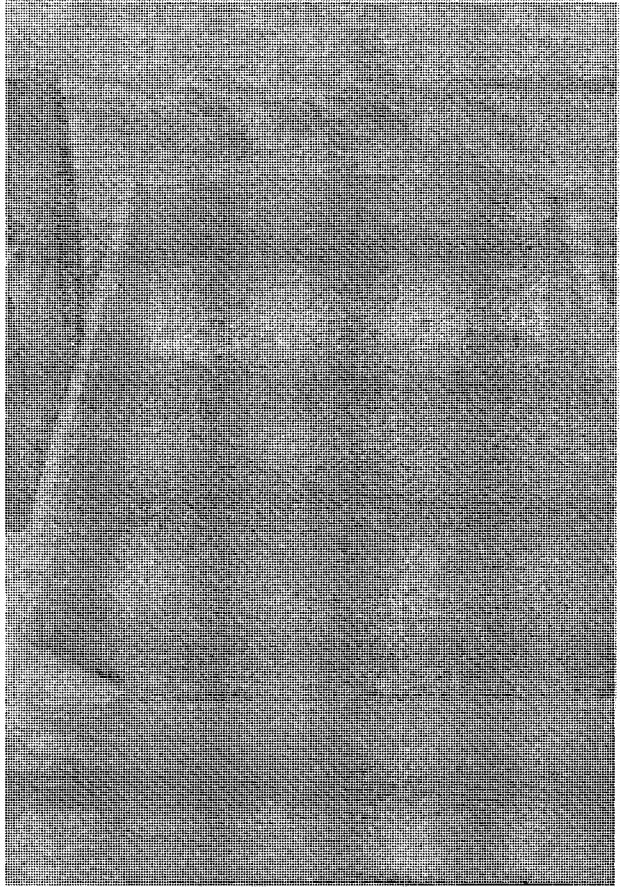
Vedle epoxidových, polyesterových a polyuretanových plastbetonů byla největší pozornost věnována plastbetonům furanovým [21, 22, 23, 24, 25, 26], což je



Obr. 5. Příprava k obetonování trub složených ze segmentů z furanového plastbetonu na provizorních ocelových koších.

Рис. 5. Подготовка к облицовке состава сегментов из фуранового пластбетона на временных стальных каркасах.

Fig. 5. Preparatory stage of rendering of tubes consisting of furanic resin concrete sectors supported on steel cages.



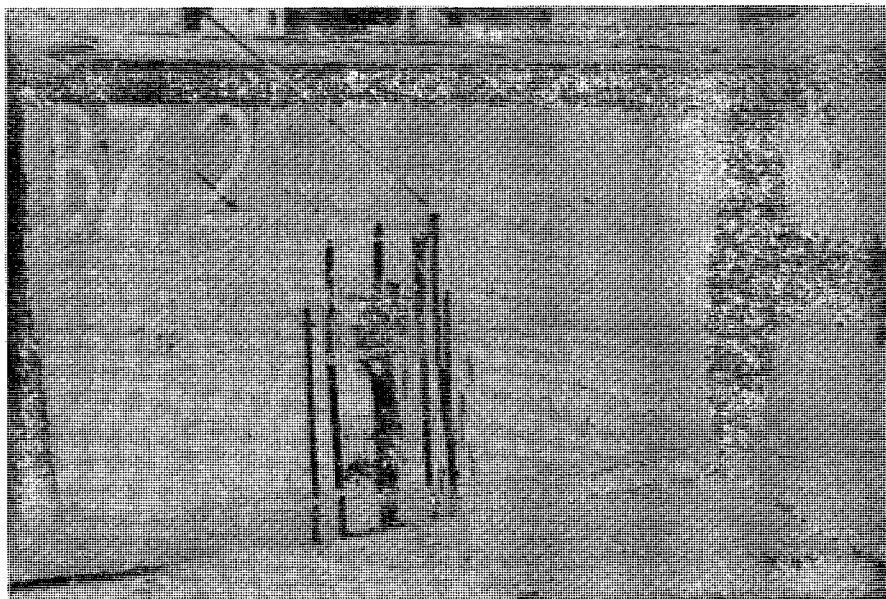
Obr. 6. Příprava zkušebních těles pro studium šíření plošné trhliny vnitřním přetlakem (rub plastbetonové desky s uměle vytvořenou plošnou diskontinuitou před zabetonováním).

Рис. 6. Изготовление образцов для изучения распространения плоской трещины вследствие внутреннего давления и (искусственно образованный плоский дефект на обратной стороне).

Fig. 6. Arrangement of test for studies of flat crack propagation due to internal pressure (artificial bidimensional defect on the reverse side).

odůvodněno kromě vysoké chemické odolnosti furanových pryskyřic zejména jejich perspektivitou, protože nejsou závislé na ropné surovinové bázi.

Všestranné a hluboké studium těchto nových strukturních systémů, které se z mechanického hlediska vyznačují zvláště rozdílnými fyzikálními, chemickými, přetvárnými a reologickými vlastnostmi obou přítomných pevných fází a jejich interakce s vnějším prostředím, umožnilo navrhnout a ve velkém měřítku provést řadu konstrukcí s vysokou produktivitou, významnými ekonomickými úsporami a dlouhou životností.



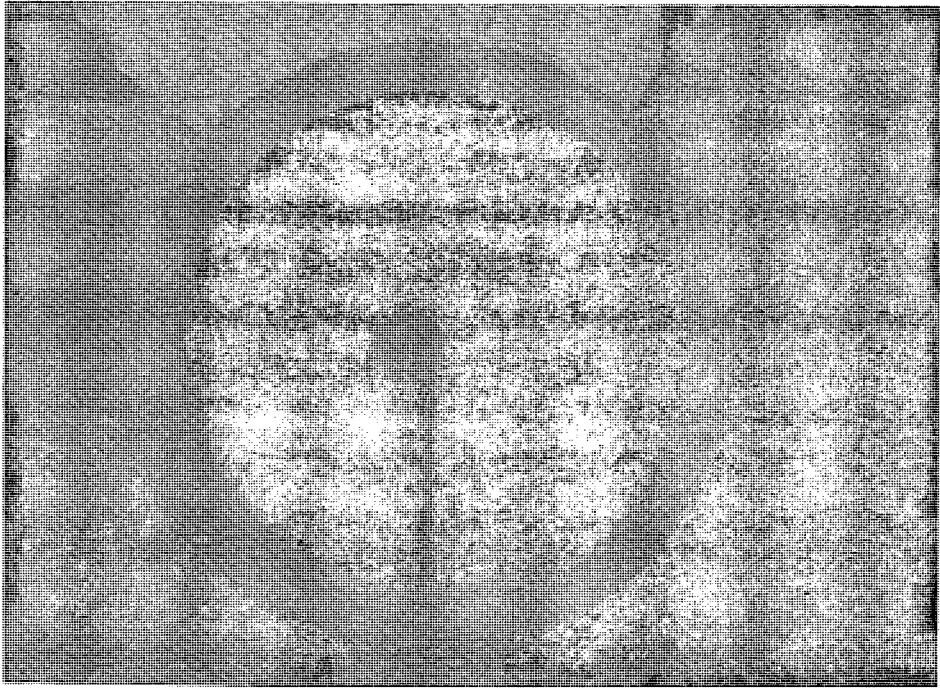
Obr. 7. Indikace šíření plošné trhliny podle výtoku z předvrtané sítě otvorů v závislosti na velikosti přetlaku a době jeho působení.

Рис. 7. Индикация распространения плоской трещины истечением из предварительно буренной сети отверстий в зависимости от величины избыточного давления и продолжительности его действия.

Fig. 7. Indication of flat crack propagation by effusion from pre-drilled hole system in dependence on pressure and time of its action.

Pro silně agresivní odpadní vody z chemické výroby bylo ve spolupráci s n. p. Doprastav navrženo a vedle tradičně provedené zděné stoky postaveno potrubí z obetonovaných jader \varnothing 140 cm a tloušťky 4 cm z furanového plastbetonu (berolu) již v roce 1963 (obr. 1, 2). Kromě neobvyklé úspory finanční a enormního zvýšení produktivity se prokázalo po téměř dvacetiletém provozu, že potrubí je bez jakýchkoli zjevných vad, zatímco tradiční stoka je zcela zničena.

Výstavba hlavní kanalizační stoky o délce více než 11 km a průměru od 220 cm do 360 cm byla ve spolupráci s n. p. Výstavba dolů uranového průmyslu navržena a provedena ze segmentů z furanového plastbetonu (obr. 3). Montáž ve výkopu i štolu se prováděla prostřednictvím ocelových košů, které po obložení na staveništi berolovými segmenty byly transportovány na místo a obetonovány. Poté se ocelové koše odstranily a znovu použily (obr. 4, 5). Řada problémů provozního charakteru byla ověřena předchozí zkouškou ve skutečné velikosti, řada jiných byla řešena laboratorně. Např. v souvislosti se stavbou stoky se rovněž studovaly podmínky



Obr. 8. Železobetonové trouby \varnothing 150 cm s jádrem z furanového plastbetonu.

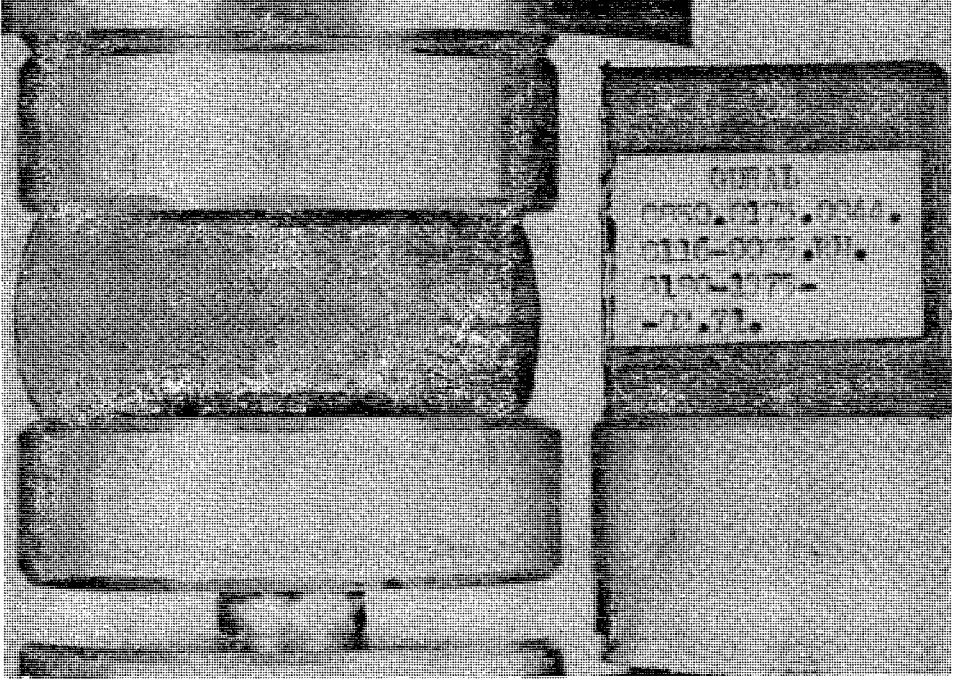
Рис. 8. Железобетонные трубы диаметром 150 см с облицовкой из фуранового пластбетона.

Rig. 8. Reinforced concrete 150 cm diameter pipes with furanic resin concrete core.

šíření plošných technologických defektů na styku tenké berolové desky s tuhým betonovým podkladem, namáhaných vnitřním vodním přetlakem (obr. 6, 7). Za základ teoretických úvah byla zvolena Griffithova podmínka pro šíření lomové trhliny a elastická deformační energie byla uvažována z ohybu kruhové tenké desky nad trhlinou. Teoretické řešení bylo kontrolováno experimentálně. Velmi dobrá shoda vypočtených a naměřených hodnot tlaku (cca 15 %) pro daný rozměr defektu ($d = 20$ cm) umožňuje spolehlivě předvídat vznik a šíření poruch tohoto typu, které se vyskytují často i u jiných stavebních konstrukcí.

Na jiném místě při výstavbě kanalizační sítě byly použity předvyrobené železobetonové trouby o průměru 150 cm s berolovým jádrem vloženým při betonáži jako vnitřní bednění (obr. 8).

Pro výstavbu velkého chemického kombinátu k ochraně před silně agresivním prostředím byla navržena ve spolupráci s n. p. Priemstav ochrana všech betonových konstrukcí (plochy, kanály, základy, nádrže atd.) jiným druhem furanového plastbetonu, se zvýšenou houževnatostí a podstatně (cca o 5 řádů) sníženou elektrickou vodivostí.



Obr. 9. Kompozitní materiál s křehkou maticí a poddajným plnivem před a při zkoušce tlakem.

Рис. 9. Композитный материал с хрупкой матрицей и податливым заполнителем до испытания давлением и в течение его.

Fig. 9. Composite material with brittle matrix and plastic cementitious substance prior to and during pressure test.

3.5. *Polymery impregnované hmoty*

Ukázalo se, že následné vytvoření druhotné struktury v porézním materiálu vede k významným zlepšením vlastností. Pro impregnaci betonu vhodným monomermem a pro jeho polymeraci, tedy k vytvoření dvoustrukturního tuhého systému byla vypracována vhodná technologie s maximálním využitím na tuzemském trhu dostupných surovin.

Impregnace směsí styrenu a trimetylpropantrimetakrylátu byla ověřena též ke zpevnění stropních konstrukcí porušených trvalým dynamickým namáháním. Výrazného zlepšení mechanických vlastností, a zejména životnosti bylo dosaženo impregnací sádrových výrobků furylalkoholovým monomermem.

3.6. Jiné systémy

Teoretické úvahy o vzájemném ovlivnění fyzikálních vlastností jednotlivých fází na styku vedlo k návrhu materiálu, složeného z vysoce poddajných částic (pryže) a tuhé spojitě sítě z křehkého polymeru. Ovlivněním mezipovrchových vlastností podařilo se dosáhnout materiálu, jehož mezní přetvoření je bez porušení spojitě strukturní sítě $80 \times$ vyšší než mezní přetvoření samotného materiálu sítě, zkoušeného v kompaktu (obr. 9). Kromě výhodného zpracování pryžového odpadu může řešit aplikace tohoto materiálu řadu problémů v průmyslových provozech a zemědělství.

Stále rostoucí nároky na úspory energií a materiálů vedou k tomu, že se častěji uvažuje o rekonstrukci morálně starých nebo technicky vysloužilých budov k novým účelům spíše než o náhradě novými. Vynikající možnosti v tomto směru dávají plasty. Umožňují nejen zlepšení fyzikálních parametrů (např. vyšší teplotně a zvukově izolační schopnosti), ale i zvýšení únosnosti stávajících nosných prvků [27].

Možnosti použití plastů pro rekonstrukce a návody k jejich vhodnému cílenému použití bylo rovněž náplní práce oddělení v minulém roce.

4. Perspektivy mechaniky kompozitních materiálů

Mechanika kompozitních materiálů jako hraniční vědní oblast se musí rozvíjet v souladu s rozvojem poznatků i v oborech, které se její problematiky dotýkají. Nutno říci, že v této spolupráci se zatím více než je zdrávo, využívá empirie. Příspěvky k mechanice strukturních systémů jsou a budou muset být v nejbližším údobí stále ještě do značné míry spekulativní. Dílčí řešení však nevyklučují přinést užitečné výsledky i za použití poznatků a metod, které jsou k dispozici v současnosti. Proto i program výzkumů v ÚTAM vychází z této skutečnosti a zaměřuje se na reálně zvládnutelné problémy, které mají i předpoklady přinést účinný pokrok v technické praxi.

Základním problémem, na které se úsilí soustřeďuje, je přesnější poznání funkce rozhraní a jeho kvantifikace v analytických operacích, zejména při řešení otázek porušení. Je to celá složitá oblast funkce adhezních a kohezních sil při reakci na mechanickou napjatost, především koalescentních a fibrilárních systémů. Druhým základním problémem je poznání a funkční vystižení podmínek vytváření a transformování silových toků ve struktuře namáhaného tělesa. Kontextem celého záměru však zůstává, tak jak již v původní koncepci bylo vytyčeno, směřovat k vytváření systémů s především zadanými mechanickými, ale i elektrickými, chemickými a jinými vlastnostmi.

Oblastí, která se jeví nejpokročnější v poskytnutí prakticky upotřebitelných

výsledků, je dopracování teorie polykrystalických struktur, která by měla přispět k objektivnímu hodnocení podmínek iniciace jejich porušování.

Pozornost fibrilárním systémům bude věnována zejména z hlediska odvození potřebných, fyzikálně zdůvodněných materiálových parametrů, vstupujících do vztahů pro hodnocení dlouhodobé pevnosti dlouhovláknitých systémů prvního a čtvrtého typu.

LITERATURA

1. DUSIL, J.—PATROVSKÝ, J.: Vyztužené plasty. [Důvodová zpráva.] Praha, FMTIR 1979. — 2. BAREŠ, R.—JAVORNICKÝ, J.—NAVRÁTIL, J.—BERKA, L.: Některé základní rysy mechaniky nehomogenních materiálů. *Staveb. Čas.*, 21, 1973, č. 6/8, s. 478—490. — 3. BAREŠ, J.—BERKA, L.—JAVORNICKÝ, J.: Issledovanie svojstv furanogo plastbetona kak dispersnoj struktury. *Kolloid. Ž.*, 29, 1967, č. 3, s. 318—325. — 4. Kompozitní materiály. Ed. J. Němec. In: Sbor. Předn. Semin. Čs. společnosti pro mechaniku při ČSAV 1981. — 5. BAREŠ, R.: In: Sbor. Kompozitní materiály. Ed. J. Němec. Praha, Čs. společnost pro mechaniku při ČSAV 1981, s. 132—139. — 6. JAVORNICKÝ, J.: Photoelastic Investigation of Cast Plates with Inclusions. In: Proc. 4th int. Conf. Exp. Stress Analysis. Cambridge 1970, s. 39—46. — 7. JAVORNICKÝ, J.—BAREŠ, R.: Rozhraní v kompozitních materiálech. [Zpráva.] ÚTAM ČSAV 1981. — 8. BAREŠ, R.: Vlastnosti systematických kulových agregátů. [Zpráva.] ÚTAM ČSAV 1974, 69 s., 14 obr., BAREŠ, R.: Vliv ohraničení strukturální soustavy monofrakčních kulových agregátů. [Zpráva.] ÚTAM ČSAV 1975, 43 s., 17 obr. — 9. JAVORNICKÝ, J.: In: Sbor. Kompozitní materiály. Ed. J. Němec. Praha, Čs. společnost pro mechaniku při ČSAV 1981, s. 26—42. — 10. JAVORNICKÝ, J.: Mechanik der Bauwerkstoffe und spannungsoptischer Beitrag zu ihrer Entwicklung. *Österr. Ing. Z.*, 24, 1981, s. 149—150, 171—178. — 11. JAVORNICKÝ, J.: Photoelastic Investigation of States of Stress of Matrices in the Agglomerates of Two and Three Circular Inclusions. *Trudy 7. Vsesojuz. Konf. Issledovanie naprjaženij*. 4. díl. Tallin 1971, s. 92—107. — 12. BERKA, L.: On Stress Distribution in a Structure of Polycrystals. *J. Mater. Sci.*, 17, 1982. — 13. MÍNSTER, J.—BERKA, L.: Mechničeskije svojstva voloknistych kompozitov typu tekstilja. In: Proc. 1st nat. Conf. Mechanics and Technology of Composite Materials. Varna 1977, s. 496—501. — 14. MÍNSTER, J.: The Non-Linear Time Dependent Deformation Processes in Anisotropic Polymer-Made Technical Fabrics. *Acta techn. ČSAV*, 1980, č. 4, s. 485—498. — 15. BAREŠ, R. A.: Nenasyčené polyesteru a jejich vlastnosti. *Stavivo*, 1980, č. 6, s. 243—248. — 16. BAREŠ, R. A.: Poruchy polyesterových podlahových systémů. *Stavivo*, 1980, č. 7—8, s. 319—323. — 17. BAREŠ, R. A.: Fyzikální příčiny poruch polyesterových systémů. *Stavivo*, 1980, č. 9. — 18. BAREŠ, R. A.: Chemické a mikrobiologické příčiny poruch polyesterových systémů. *Stavivo*, 1980, č. 10. — 19. BAREŠ, R. A. Physical Reasons of Polyester Resin Surfacing Systems Failures. 2. nat. Conf. Mechanics and Technology of Composite Materials. Varna 1979. — 20. BAREŠ, R. A.: A Method of Protection of Drinking Water Concrete Reservoirs. In: Sbor. ICP int. Symp. Plastics Waterproofing in Civil Engineering. Liège 1977. — 21. BAREŠ, R. S.: Nová koňtrukční stavební hmota na bázi furalové pryskyřice. *Inž. Stav.*, 1961, č. 3, s. 103—104. — 22. BAREŠ, R. A.: Les bétons de furane et leurs applications, *Cah. Cent. Sci. Techn. Bâtim.* No. 76, 1965, č. 647, s. 9—16. — 23. BAREŠ, R. A.—JAVORNICKÝ, J.—NAVRÁTIL, J.—BERKA, L.: Practical application of synthetic constructive materials as a result of exact definition of material properties. *RILEM Symp. Recherches et réceptions des matériaux de synthèse, utilisés dans la construction*. Liège 1965. Congr. et Colloq. Université de Liège. Vol. 52. — 24. BAREŠ, R. A.: Some Physical Properties of Resin Concretes, *RILEM. Colloq. int. Experimental Research on New Developments Brought by Synthetic Resins to Building Techniques*. 1967 Paris. — 25. BAREŠ, R. A.: Resin Concretes. *Chem. and Ind.*,

11, 1970, č. 4, s. 482—487. — 26. BAREŠ, R. A.: Furane Resin Concrete and its Applications to Large Diameter Sewer Pipes. Fall Convention ACI. Mexico 1976, 41 s., 30 obr. — 27. BAREŠ, R. A.: Materiály. Staveb. Ročen., 1980, SNTL 1979, s. 7—46.

Odevzdáno 19. 5. 1982.

Diskusní příspěvky k tomuto článku (v rozsahu nejvíce 2 stran) pošlete trojmo redakci časopisu do 31. 3. 1983, abychom je mohli uveřejnit v čísle 8, 1983.

Ян Яворницки, Рихард А. Бареш

РАЗВИТИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕХАНИКИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИНСТИТУТЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ЧЕХОСЛОВАЦКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Предлагаемая статья описывает обзор развития проблем композитных материалов в Институте теоретической и прикладной механики Чехословацкой академии наук с начала пятидесятых лет и чертит главные характеристики концепции и направлений этих научных исследований, специфические для упомянутого научного института. В международном сравнении — композитный материал как структуральная система, проблема внутренней поверхности раздела фаз, выведение формул для упругих констант двухфазных плотных систем и систем с разрывной или неразрывной пористостью и жидкой фазой, концепция поликристаллических сред как сложных веществ и концепция разрушения как предела энергетической ёмкости системы, выраженной эластанцией.

Авторы докладывают о некоторых приложениях теории и полученных знаний, касающихся строительных материалов и элементов, прежде всего фуранового пластбетона, представляющего собой конструктивно-изоляционный материал для химически агрессивных жидкостей, вклады в проблемы разработки покрытий из полиэфирной смолы и коррозионностойких пропитанных и инфраструктурных систем, в некоторых случаях обладающих электропроводностью. Авторы предлагают вклады в решение долговременного деформирования и прочности технических тканей и начерчивают пути будущей разработки проблематики, которая согласно современной концепции должна сосредоточить внимание к вопросам разрушения структурных систем и к проблемам влияния междофазного сцепления.

Замечания и отзывы к этой статье надо послать в трех копиях (не более 2 страниц) редакции журнала до 31. 3. 1983 г., чтобы можно было опубликовать их в номере 8, 1983 г.

Jan Javornický, Richard A. Bareš

DEVELOPMENT AND PROSPECTS OF MECHANICS OF COMPOSITES IN INSTITUTE OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, CZECHOSLOVAK ACADEMY OF SCIENCES

The Authors of the paper present an outline of the development of problems of composite materials treated at the Institute of Theoretical and Applied Mechanics from the beginning of the fifties and characterize the main features of the concept and the aims of this investigation at the Institute. In an international setting they are: composite material as a structural system, role of internal interphase boundary, influence of filling of internal space of the system, deduction of formulae for elastic constants

of two-phase compact systems and systems with non-continuous and continuous porosity and the liquid phase, concept of polycrystalline media as complex substances and concept of failure as a limit of energetic capacity of a system expressed in terms of elastancy.

The Authors describe some applications of the obtained results in building structural materials and elements, particularly of furanic resin concrete as a structural and isolation material used against chemically aggressive liquids, contributions to the treatment of polyester resin finishings and corrosion-resistant impregnated and infrastructure systems, eventually capable of electric conductivity. The Authors mention contributions to the solution of problems of long-term deformation and strength of engineering textiles and sketch out the ways to further treatment of problems which in its present concept should concentrate rather on problems of failure of structural systems and influence of interphase adhesion.

Discussion of this paper should be sent in triplicate (one discussion not exceeding 2 pages) to the Editor by 31. 3. 1983, to be published in Number 8, 1983 of this Journal.