

## Jevy provázející vznik složených systémů

V moderní době se rozšiřuje používání složených, mnohvrstevných (sendvičových, kompozitních) systémů, v nichž z použitých vrstev má v systému svou specifickou funkci. Podívejme se na tyto systémy trochu z druhé strany, tak říkajíc „na ruby“: nikoliv na teoretický popis hotového systému, ale na celou složitost jevů při vzniku takových systémů a jejich využívání.

Přirozeně, jako u každého nového systému, předchází praktické aplikace důkladnému teoretickému poznání. To vede ovšem nezbytně ke vzniku řady poruch, které někdy mohou vývoj zpomalit nebo dokonce zastavit. Stejně tomu je při rozvoji kompozitních, vrstevnatých systémů. Setkáváme se s nimi všude – ve střeších, v podlahách, v obvodových prvcích, v inženýrských stavbách.

Nesmírně výhodné některé vlastnosti plastů proti tradičním hmotám vedou ke snaze řešit s nimi letité problémy, současně jejich poměrně vysoká cena vede k optimalizaci jejich objemu, jejich tloušťky.. Proto se části (vrstvy) z těchto nových hmot spojují s částmi (vrstvami) ze starých, osvědčených hmot ke zmenšení hmotnosti prvků, zlepšení vlastností, úsporu energie atd., nutno říci někdy také proto, že je to moderní, nebo spíše módní, mnohdy bez znalostí o chování výsledného systému. Svědčí o tom i některé příklady takových poruch z poslední doby.

Jakmile se vytvoří systém z vrstev s odlišnými fyzikálními vlastnostmi (o chemické rozdílnosti a jejím vlivu zde nebudeme pojednávat), dochází ihned při jakémkoli vnějším nebo vnitřním namáhání systému ke složitým stavům napjatosti na rozhraní vrstev a v jejich okolí. Žádnou vrstvu nelze pozorovat pouze odděleně od ostatních částí a systému (např. tepelně izolační vlastnost, paro- nebo vodopropustnost, chemická odolnost atd.), s nimiž je v příčinné interakci. Primární hledisko je strukturnost systému jako celku, ať již jde o čistě fyzikální jevy (součinitel teplotní či vlhkostní roztažnosti), nebo mechanické (pevnost, modul) či přetvárné (pracovní diagram, mezní přetvoření) nebo reologické (creep, relaxace) jako odezva vnějších vlivů, nebo o jevy spojené s jejich vznikem (smrštění při tvrdnutí).

Základní požadavek úspěšnosti těchto systémů je **tvárová kompatibilita** na styku všech vrstev ve všech stadiích existence a využívání systému.

Nejběžnější poruchou všech složených systémů je oddělení jednotlivých vrstev z těch nebo oněch příčin a tím ztráta kompozitního působení. Všimněme si některých vlivů které tato porušení vyvolávají nebo k němu přispívají.

## Změny při tvrdnutí

Jednotlivé vrstvy jsou obvykle nanášeny postupně, ve formě tekuté nebo plastické směsi a tvrdnou na místě. Tvrdnutí je vždy provázeno objemovými změnami, většinou smrštěním. Tak již při tvorbě systému vnášíme do něj napětí; naštěstí smrštění probíhá nejrychleji v první fázi tuhnutí, před přechodem do tuhého stavu. Doznívá však ještě dlouho, týdny, měsíce i roky, podle materiálu. Protože každá vrstva samotná je strukturní systém, např. pojivo se segregovaným nebo agregovaným plnivem, vznikají kromě napětí celého systému i napětí v substruktuře, tahová v matrici, tlaková v plnivu a smyková na styku obou. V kompozitu je nová, tvrdnoucí vrstva (složka) tažena, předchozí vrstva tlačena a na jejich styku působí smykové napětí.

Napětí v substruktuře pojeného plniva od smrštění matrice se odhadují podle experimentálních vyšetřování (jež jsou však vždy jen hrubě přibližná) na hodnoty minimálně 2,5 až 3,0 MPa pro pojiva s tahovou pevností větší než 30MPa (a s mezním přetvořením ~ 1%), mohou však dostupit podle použité technologie až meze pevnosti. Smykové napětí při obvyklém poměru smykového modulu pružnosti pojiva a plniva ~ 1/10, dosahují podle různých vyšetřování 27 až 15% normálních tahových namáhání. V určitém okamžiku je přípustné jen takové smrštění pojiva, (příp. části kompozitního systému), při kterém je umožněna relaxace vznikajících napětí díky creep jednotlivých fází nebo částí systému, příp. Styku fází. Tím vystupuje do popředí vliv rychlosti tvrdnutí: čím pomalejší je postup tvrdnutí, tím je napjatost systému vlivem napětí od smrštění výhodnější.

U plastů je např. možno ovlivnit dynamiku makromolekulární infrastruktury vhodnou volbou komponent pojiva tak, aby vzrůst viskozity byl pomalejší než vzrůst smršťování systému: toho se dosáhne pokud nejdříve dochází k růstu dlouhých lineárních řetězců a teprve na konci polymerace k jejich propojování a vytváření spojitě prostorové sítě.

Jestliže napětí uvnitř systému jsou větší, než některé z momentálních hodnot jeho pevností (pevnost pojiva v tahu, plniva v tlaku, styčné spáry ve smyku) může dojít k mikroporuchám, které v pozdější fázi a z jiných příčin mohou být zárodkem celkového porušení nebo snížení životnosti. Převážně k tomu dochází při nadměrně rychlém tvrdnutí. Může ale také již v této fázi dojít k makroporušení, např. oddělením vrstev systému, provázenému obvykle vznikem hlubokých široce otevřených trhlin nebo nepřípustnou deformací systému. Tento jev se může projevit i po letech jako důsledek vyčerpání trvalé pevnosti při neustálém nárůstu vnitřních napětí od smrštění nebo kombinací s některým jiným vlivem (např. teplotou).

Ve strukturním systému z tvrdnoucího pojiva a plniva je napjatost od smrštění tím větší, čím je objem pojiva (matrice) mezi zrny plniva menší jako důsledek adaptability slabšího partnera při působení mezifázových napětí. Proto je výhodná i jistá pórovitost (uzavřená) systému, kterou se dosáhne dalšího snížení množství pojiva a průměrné tloušťky jeho vrstev v soustavě. Navíc prázdný prostor umožní bez vzniku velkých napětí značnou deformaci článků pojiva: podle experimentálního vyšetřování na modelech s pórem bylo

charakteristické napětí (od smrštění) nižší až o 12%, celkové snížení napětí (energeticky) činilo více než 15%. Menší průměrné vrstvy pojiva se dosáhne též těsnějším uspořádání zrn plniva.

Stejně tak i napětí od smrštění ve styčné spáře vrstev je tím větší, čím je tloušťka tvrdnoucí vrstvy větší.

Nutno poznamenat, že nadměrná napjatost od smrštění ve struktuře tvrdnoucí vrstvy (i s případnými jejími poruchami) není však obvykle tolik nebezpečná a málokdy se projeví u běžných aplikací. Naproti tomu nadměrná napjatost od smrštění některé vrstvy v kompozitním systému jako celku je obvykle nebezpečnější: vyčerpání pevnosti ve smyku (soudržnosti) ve pravidelně k náhlému a úplnému porušení systému.

Např. u polymerbetonů to znamená požívat agregátu hutné skladby (což převedeno do praktického vyjádření znamená směs pojiva a plniva ve hmotnostním poměru od 1 : 12 podle druhu granulometrii a velikosti plniva, způsobu zpracování a viskozity pojiva). u segregátu (stěrek, litých podlah, povrchových vrstev agregovaných systémů) aplikovat vrstvu minimální tloušťky (což vyjádřeno absolutně znamená tloušťku cca 1 mm). U systémů segregovaných nebo z čistých pryskyřic představuje tloušťka větší než 2-3 mm, bez ohledu na druh podkladu, již potenciální nebezpečí vzniku poruch. Samozřejmě záleží na absolutní hodnotě smrštění samotného pojiva (pryskyřice): u polyesterových pryskyřic se tato hodnota pohybuje v oblasti 3 – 10%, u epoxidových pryskyřic pod 1%.

### **Teplotní účinky (dilatace)**

Součinitel teplotní roztažnosti novodobých a tradičních hmot se silně liší, takřka řádově. Jakákoli změna teploty od teploty „rodové“, při níž probíhalo tvrdnutí, vyvolá vznik vysokých vnitřních napětí v substruktuře i v celé, systému. Při pozvolných změnách teploty lze oprávněně počítat s reologickými vlastnostmi zúčastněných materiálů. Při rychlých změnách teploty (teplotních šocích) však jen stěží může systém přenést vznikající napětí bez porušení.

Např. ve struktuře polymerbetonu s křemennými zrny plniva se součinitelem teplotní roztažnosti  $0,8 \cdot 10^{-5}$  vznikne rozdíl délkového přetvoření proti pojivu (pryskyřici) při změně teploty o  $10^{\circ}\text{C}$  0,072% Rozdíl objemového přetvoření při této změně teploty 0,216%. V analogii s dříve zmíněnými experimenty vychází v důsledku změny teploty o  $10^{\circ}\text{C}$  napětí řádu 5,0 MPa (v pojivu a plnivu opačného znaménka). Z rozdílných deformací obou partnerů lze usoudit na velikost napětí ve smyku na styčné spáře: činí cca 0,7 – 1,3 MPa podle rychlosti změny teploty.

Čím je větší tepelná kapacita vrstvy, tím méně tím méně je zranitelná teplotními změnami: proto polymerbeton (dobrého složení, s vysokým podílem plniva) je podstatně méně citlivý ke změnám teploty než skelný laminát s převahou pojiva.

Naštěstí obvykle poměrně značná izolační schopnost a nízká tepelná vodivost matrice zabrání rychlým změnám teploty vnitřních vrstev. Teplotní namáhání substruktury bude tedy jen zřídka natolik podstatné, aby výrazněji ovlivnilo celkovou napjatost, případně přivedilo vnitřní mikroporuch v ní. Větší namáhání vzniknou v povrchových vrstvách, které jsou navíc vystaveny přímému působení tepelným šokům.

Daleko vážnější je opět vliv změn teploty v kompozitním systému jako celku. Čím tenší je vrstva přímo teplotou namáhaná, a čím menší její teplotní kapacita, tím rychleji bude jako celek reagovat na změny teploty a tím se stává nevýhodnější (opak požadavku na tloušťku vrstvy z hlediska smrštění).

Snížení teploty pod „rodovou“ teplotu nepříznivější než její zvýšení. Účinky se tehdy sčítají s účinky smrštění, ve vrstvě s větším součinitelem teplotní roztažnosti vznikají proti ostatním vrstvám tahová napětí. Avšak i snížení teploty z vyšší ustálené hodnoty může být obdobně nepříjemné, zvláště probíhá-li rychle.

Na styku rozdílných vrstev vznikají při změnách teploty podstatná smyková napětí (dostředná při snížení teploty, výstředná při zvýšení) jejichž hodnota, kromě teplotní změny a součinitelů teplotní roztažnosti vrstev, závisí na modulu pružnosti, modulu přetvárnosti, mezním přetvoření relaxaci napětí a creep vrstev.

Čím jsou moduly obou vrstev bližší, tím menší je smykové kontaktní napětí (stejně jako napjatost systému). Čím jsou teplotní změny rychlejší, tím vzniká nejen větší napjatost systému, ale i kontaktní zóny.

Průběh smykového napětí po tloušťce vrstvy není lineární; maximální hodnoty dosahuje v okolí kontaktní zóny a snižuje se k odlehlým okrajům vrstev za předpokladu dokonalého spojení vrstev. V případě nedokonalého spojení nebo nespojení mění se normální napětí v systému po výšce jen málo. Na okrajích tohoto nespojeného místa vznikají (jako u každého ukončení, např. u dilatace v podlahovině), koncentrace vodorovných smykových napětí. Smyk na okrajích dosahuje více než dvojnásobku (ale podle některých měření i desetinásobku) průměrné hodnoty smyku. To prokazuje větší zranitelnost systému a jeho menší odolnost různým vlivům (smrštění, změně teploty) v každém místě, ve kterém je jeho kontinuita, nebo kontinuita některé vrstvy (nebo kontinuita napojení vrstev) přerušena. Proto např. dilatace všech vrstev by měly být prováděny v jednom místě, a co nejméně.

Z horního rozboru opět vyplývá, že s ohledem na obvykle větší hodnotu součinitele teplotní roztažnosti pojiva proti plnivu měl by být jeho obsah v systému co nejnižší (s minimální tloušťkou vrstvy pojiva v substruktuře mezi částicemi plniva).

Během času se účinky změn teploty zhoršují vzhledem k zhoršování reologických vlastností pojiva (křehnutí). Na druhé straně napětí od smrštění časem relaxují, takže zbývá větší rezerva pro teplotní napětí, zejména při teplotách nižších, než „rodová“ teplota. Okamžik

porušení je výslednicí řady okolností, z nichž významnou úlohu hraje i trvalá pevnost pojiva (v tahu, soudržnosti, ve smyku).

### **Kompozitní působení**

Jeli systém vícevrstvý nebo s nehomogenně rozdělenou hustotou a tedy strukturním uspořádáním, dochází při jakýchkoli změnách zmíněných dříve (změnách teploty ale též vlhkosti, smrštění potvrdnutí), vzhledem k různým fyzikálním vlastnostem jednotlivých vrstev, k tzv. kompozitnímu působení, tj. k vzájemnému mechanickému namáhání vrstev jednostranným smykovým tokem, následovanému ohýbáním systému podobně, jako se tomu děje např. U bimetallického článku. Při zvyšování teploty dochází k vydouvání, při ochlazování naopak ke konvexnímu zdvihání okrajů, vytvořených ať již při výrobě (dilatace, ukončení, prostupy, pracovní spáry) nebo vytvořených důsledkem vnitřního napětí spontánně (trhliny), vždy za vzniku značných smykových namáhání ve styčných spárách vrstev. K poruchám dochází nejdříve v nejslabším styku.

Při velkých rozdílech součinitelů teplotní roztažnosti a velkých změnách teplot nemůže sebelepší celkové spojení vrstev, vzhledem k velikosti vznikajících napětí, poruše (odtržení) na styku zabránit. Jediná cesta je proto maximální omezení rozdílnosti fyzikálních vlastností jednotlivých vrstev. Navíc je vhodné systém uspořádat vždy tak, aby byl pokud možno ke střednicové rovině přetvárně symetrický; to se dá řídit tloušťkou vrstev, jejich vlastnostmi, jejich umístěním v systému.

### **Mechanické vlastnost**

Při zatížení složeného systému osamělým břemenem dochází ke vzniku příčných ( např u podlah horizontálních) napětí, jež mohou rozhodujícím způsobem ovlivnit jeho využitelnost. Rozhodující jsou moduly pružnosti (přetvárnosti) a Poissonovy součinitelé, resp. rozdíly těchto veličin mezi sousedními vrstvami.

Při dynamickém namáhání vzniká v důsledku rozdílného tlumení tím větší napjatost kontaktní zóny, čím jsou rozdílnější moduly pružnosti; při namáhání statickým osamělým břemenem vzniká tím větší napjatost kontaktní zóny, čím jsou rozdílnější Poissonovy součinitelé. Čím je tloušťka systému nižší, tím více se uplatní vliv rozdílnosti těchto veličin a tím více též rozhoduje pevnost podkladu (podložky) a vzájemná soudržnost vrstev. Naproti tomu velmi tenká vrstva (nátěr, samorozlévací vrstva do tloušťky 1 mm) přejímá již do takové míry vlastnosti podkladu, že příčné namáhání od zatížení osamělým břemenem nebude rozhodující.

Jak velké je přípustné (mezní) osamělé břemeno (statické)? Za předpokladu mezního namáhání stykové spáry 0 MPa a za předpokladu roznášení břemene pod úhlem 45° a pro hodnotu Poissonova součinitele vrstev 0,15 a 0,30 vychází přijatelná tloušťka přímo zatížené vrstvy 2 cm. Tomu odpovídá statické břemeno cca 5300 N, což odpovídá bodovému provoznímu zatížení 2600 – 1000 N podle stupně dynamického působení. Při tloušťce vrstvy

5 mm a  $\mu = 0,4$  (stěrka) je dosaženo mezního stykového napětí 1 MPa již staticky působícím břemenem 250 N. Není pak divné, že dochází při zatěžování bodovým břemenem často k porušení styku.

Čím je horní vrstva (zatížená) tenčí, tím vyšší pevnost pokladu je žádoucí, u vrstev několikamilimetrových 20,0 – 25,0 MPa, u vrstev centimetrových 15,0 – 20,0 MPa.

## Vlivy strukturní

Substruktura vrstvy je ovlivněna jejím složením (poměrem a vlastnostmi komponent), zpracováním a ošetřením. Každý z uvedených vlivů má stejnou důležitost; i zde je řada problémů a řada kritérií pro správný postup. S předmětem tohoto článku přímo nesouvisí a nejsou podrobně popisovány.

## Vliv vody

Vliv vlhkosti sám je nesmírně důležitý a složitý a jeho podrobná analýza by zasloužila samostatné pojednání. Zhruba, zjednodušeně, lze rozdělit fyzikální působení vody do dvou skupin: vliv vody kapilární a vliv vody pronikající pod tlakem. K tomu přistupuje chemické působení vody, příp. i mikrobiologické, kterými se ale nebudeme zabývat.

Vlhkost v systému může být stacionární (primární, vnesená vlhkost podkladních vrstev) nebo dynamická (sekundární vlhkost pocházející z ovzduší, zemní vlhkost, vlhkost vnesená do systému nehodou). Může být v celém systému přítomna ve formě kapalné vody (vodního roztoku) nebo vodních par blízkých rovnovážnému nasycení.

Jednotlivé části (vrstvy) kompozitního systému mají obvykle, zejména s použitím novodobých hmot, silně odlišné charakteristiky: liší se velikostí a rozdělením mikropórů (vlásečnic), které mají rozhodující vliv pro kapilární vztlínání, stejně jako rozsahem celkové otevřené pórovitosti, která je rozhodující pro difuzi vody pod tlakem.

Připomeňme ještě, že u každého porézního materiálu, je-li i zcela vysušen (až na chemicky vázanou vodu ovšem), ale vzduch zaplňující jeho póry obsahuje vodní páry, dojde k sorpci na povrchu tuhých částí materiálu, dokud nenastane rovnovážný stav. Sorpci vlhkosti z okolí způsobují adsorpce – vytvoření monomolekulárních vrstev na povrchu tuhých částic, absorpce – difuze vodní páry do hmoty sorbentu, chemická sorbce – chemické spolupůsobení pohlcené vody s látkou sorbentu a kapilární kondenzace ve vlásečnicích. Každému materiálu a každému prostředí přísluší tak jistá rovnovážná vlhkost.

Při transportu vodních par materiálem se zvlhčuje materiál od rovnovážné vlhkosti do okamžiku kondenzace vlhkosti v jeho pórech. Další nasycování vlhkosti se děje převážně vodou kapalnou. Stojí za zmínku, že materiály s menším nasycením vodou poskytují lepší fyzikální vlastnosti, než plně vodou nasycený materiál.

Průřezy kanálků v materiálech, vzniklé spojením jeho pórů, štěrbinek a trhlinek jsou velmi proměnlivé od zlomku mikronu do milimetrů. V kanálcích většího průřezu voda pod tlakem proudí, do kanálků vláskových pod tlakem třeba vůbec nevniká, ale zato se do nich vtahuje kapilárními silami. V nejmenších pórech se zvyšuje tlak, urychluje pohyb vody, ve velkých se zpomaluje. Základním faktorem řídicím transport je vedle různého stupně vlhkosti též směr a velikost teplotního spádu. Důležité pro kompozity je i vysušitelnost; závisí v podstatě na stejných faktorech jako pohltivost vlhkosti, řídí se však jinými zákony: vysušitelnost je řádově pomalejší (až 100x) než pohltivost (nasákavost).

Nasákává-li se voda (kapilární) a vzduch nemůže unikát, je vodou stlačován. Velikost tlaku roste s ubývajícím průměrem vlásečnic. Např. pro kruhový průřez a hladký povrch jsou tlaky při poloměru

1	0,1	0,0001	0,0001mm
0,1	0,113	1,56	14,7 MPa

A voda by vystoupila do výšky

1,49	149	14900	149000 cm.
------	-----	-------	------------

Ve skutečnosti s ohledem na tvar. Povrch, nerovnost pórů a další vlivy jsou výšky jen malým zlomkem uvedených; kromě toho rychlost nasávání (i vysoušení) se s časem značně zpomaluje. Množství nasáté vody za 28 dní u betonů se pohybuje mezi 4 a 11% hmotnosti, postup provlhčování je ale v různých hloubkách odlišný, největší proměny vlhkosti vykazují části na povrchu.

Zdůrazním jedním důležitým závěr: porézní materiál předává vodu nutnějším materiálu, neboť tenké kapiláry nasávají vodu z tlustých kapilár.

Provlhčování horních vláken např. betonové vrstvy je provázáno prodloužením  $65 \cdot 10^{-6}$  mm/mm, což odpovídá protažení napětím 1,8 MPa. Na povrchu vznikají tlaky, v jádře tahy, dojde ke zkřivení (vydutí) vrstvy. Doba vysušení roste se čtvercem tloušťky tělesa.

Protlačovat vodu lze jen poměrně širokými trhlinkami v materiálu; pronikání vody se s časem zpomaluje až na  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{1}{3}$  prvotní hodnoty, stejně se tedy mění přetlak v různých hloubkách vrstvy. Při znečištění vody je průsak značně zpomalen, při vyšší teplotě je zrychlen. Pronikání vzduchu materiály je značně větší než vody, až 1000 krát. Jakékoli povrchové utěsnění (penetrace) značně sníží nasákavost a zvláště vysychání.

Vlhkost ve formě kondenzované hmoty (nebo vodného roztoku) nebo vody vtlačené kůžou působit svým rozklíživým účinkem na rozhraní různých fází v substruktuře a zejména na rozhraní různých vrstev kompozitního systému. V případě, kdy může dojít k vystavení systému mrazu, je zhojný vliv vody pod některou vrstvou nebo v substruktuře nasnadě.

Vlhkostní poměry v kompozitních systémech je proto třeba hodnotit zvlášť pečlivě, zejména při současném působení teplotního gradientu.

Např. v systému s málo propustnou vrstvou na povrchu (podlahovinou, krytinou) spodní vrstvy jsou schopny propustit o několik řádů více hmotnosti vodní páry. Při vzrůstu teploty o 30°C vznikne v systému přetlak cca 20 kPa. Každá náhodná nedokonalost styku vstev je pak za takových podmínek potencionálním zdrojem rozvoje plošných trhlin.

V jiném systému (obklad betonového potrubí, použitý jako ztracené bednění) každá výrobní nedokonalost betonu usnadní přístup okolní tlakové vody k rubu obkladu; k obkladu může pronikat i tlaková voda póry a konečně i voda kapilární (která však v daném případě nemá škodlivý vliv, protože obklad s menšími kapilárami ji usilovně přejímá.

### **Stárnutí**

S rostoucím časovým odstupem od zhotovení některé materiály snižují svou pružnost a poddajnost, křehnou. Poměr tahové k tlakové pevnosti se snižuje, modul pružnosti roste, rázová pevnost klesá, trvalá pevnost je nízká, jen zlomek pevnosti původní.

Poměrně rychlé stárnutí plastických hmot je známé a je to nutno považovat za jejich specifickou vlastnost. Snižená možnost relaxace napětí takových vrstev vede často k poruchám systému až po delší době po zhotovení. Není jiné pomoci, než respektovat dlouhodobé vlastnosti při volbě namáhání.

### **Úprava styku**

Nelze dostatečně zdůraznit důležitost úpravy stykové vrstvy, neboť v převážném množství jde o adhezi, jež vrstvy spojuje. Např. jestliže se neodstraní nekvalitní povrchové vrstvy betonové podložky, složené z lehkých podílů cementu a plniva, stane se po penetraci tato vrstva součástí podlahoviny ((s ní pevně spojená) a kontaktní zona vznikne mezi touto povrchovou vrstvou a vlastním betone; soudržnost mezi nimi je minimální. Pokud je podložka nenasákavá, nelze se vyhnout opatřením, zvyšujícím účinnost adheze podlahoviny (např. zvýšením specifického povrchu otryskáním či jiným podobným zásahem). Je-li podložka nasákavá, musí být penetrace provedena do dostatečné hloubky. Dokonalá penetrace pojiva (schopného chemických vazeb s pojivem podlahoviny) do struktury podkladu umožní rozložit smyková napětí z jedné roviny do celé zóny a zajistit využití mechanických vlastností podkladu v plné míře; Kontaktní spára musí mít proto smykovou (tahovou) pevnost větší (nebo alespoň rovnou), než (jako) má podklad.