

POSSIBILITY OF ADHESIVE STRENGTH EVALUATION BY TORSION TEST

POSOUZENÍ MOŽNOSTI URČOVÁNÍ KOHEZNÍ PEVNOSTI ZKOUŠKOU V KRUTU

Vladimír Černý, Jiří Burša

The contribution deals with an experimental identification of the cohesive strength of two materials connection by means of a torsion test. The aim of this work is to find such a way of cohesion strength measuring that is independent on dimensions of the specimen. The specimen made of a cylindrical steel bar with one end cast in epoxy resin has been developed. The first idea was to test specimen made of steel and rubber but technological and financial requirements made us to use epoxy resin instead of rubber. The variable specimen parameters are the connection length and diameter of the steel bar. By comparing the measurement results of specimens with various dimensions we were to prove the independence of the adhesive strength on dimensions of specimen but it failed, probably due to the high elastic modulus of resin. According to computational modeling the stress distribution along the connection length is not constant and the difference between extreme shear stress along the connection length increases with this length. Also the elastic modulus of resin considerably influences the difference between extreme shear stress. These reasons forced us to develop another type of specimen (type B) that has not been tested yet but the numerical modelling shows that this type could be better for our purpose.

Keywords: Torsion test, cohesive strength, finite element method

ÚVOD

Při používání heterogenních (kompozitních) materiálů musíme na rozdíl od homogenních brát v úvahu vznik i jiných typů mezních stavů, které se u materiálů homogenních nevyskytují. Jedním z nich je mezní stav soudržnosti (dekoheze) dvou materiálů, charakterizovaný vznikem trhliny na rozhraní těchto materiálů. K tomu, abychom mohli vyhodnotit mezní stav dekoheze potřebujeme jednak znát jeho mezní podmínku, jednak určit příslušnou mezní hodnotu kohezní pevnosti pro danou kombinaci materiálů a technologické provedení spoje. Současné metody určování kohezní pevnosti dávají výsledky závislé na tvaru a rozměru zkušebních těles, což omezuje jejich použitelnost a neumožňuje formulovat všeobecně platnou mezní podmínku.

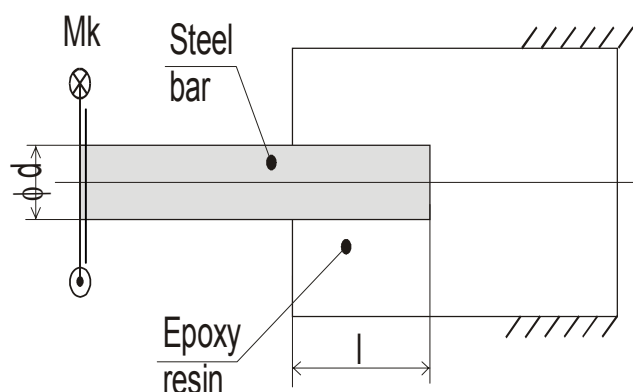
CÍL A FORMULACE PROBLÉMU

Cílem je navrhnout a ověřit takovou zkoušku soudržnosti, kterou bychom získali mezní hodnotu soudržnosti spoje aspoň částečně nezávislou na rozměrech tělesa. Přitom se zaměřujeme jednak na běžné kompozitní materiály, jednak na kompozity s hyperelastickou maticí (např. pryž-ocel), u nichž se moduly pružnosti matrice a vláken liší o několik řádů. Výpočtové modelování potvrdilo (viz [1]), že běžně používané způsoby určování soudržnosti těles např. podle ČSN ISO 5603, ČSN 621463 nebo podle norem ISO 813, 814, 5600 dávají mezní hodnotu soudržnosti závislou na tvaru a rozměrech zkušebního tělesa. Tento jev je způsoben nerovnoměrným rozložením napětí ve stykových plochách materiálů s výraznou lokální koncentrací napětí. Výsledkem těchto zkoušek je proto pouze smluvní hodnota soudržnosti, definovaná např. jako síla potřebná k vytažení ocelového kordu z pryže přepočítaná na jednotku délky nebo plochy spoje. To neumožňuje ani porovnání výsledků mezi zkouškami lišícími se jediným geometrickým parametrem zkušebního tělesa.

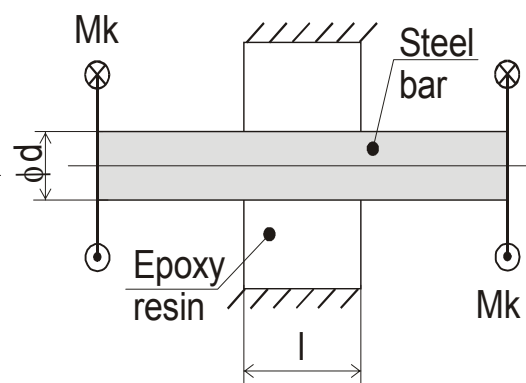
POPIS EXPERIMENTU

Na základě výpočtového modelování různých zkoušek soudržnosti oceli s hyperelastickou maticí (pryži) byla navržena zkouška krutem podle obr. 1. Kvůli finanční a technologické náročnosti výroby zkušebních vzorků jsme však byli nuceni provést experimenty s jiným typem materiálu. Zkušební vzorek se skládá z ocelové kulatiny (zastudena tažené) o průměru D , která je po odmaštění perchloretylenem zalita v epoxidové pryskyřici. Čelní plocha ocelového válce je přitom odseparována nalepením PE fólie, jejíž soudržnost s pryskyřicí je zanedbatelná. Délka zalití a průměr kulatiny jsou proměnnými parametry, pomocí nichž bychom měli prokázat nezávislost mezního smykového napětí na rozhraní materiálů na rozměrech vzorku. Pak by bylo možné tuto hodnotu považovat za charakteristiku soudržnosti spoje. Epoxidová část je nepohyblivě uchycena a na ocelová část je zatěžována krutícím momentem M_k , který byl snímán buď pomocí stroje pro zkoušky tahem a krutem Zwick Z020, nebo tenzometricky na válcovém nástavci. Ve zkušebním tělese na rozmezí obou materiálů má tenzor napětí pouze jedinou nenulovou složku a tou je $\tau_{r\phi}$. Proto maximální smykové napětí vypočítáme za předpokladu jeho rovnoměrného rozložení ze vztahu (1), kde M_k je maximální krutící moment při porušení vzorku a d, l jsou proměnné geometrické charakteristiky (viz obr.1).

$$\tau = \frac{2M_k}{\pi d^2 l} \quad (1)$$



Obr. 1: Vzorek typu A



Obr.2: Vzorek typu B

PREZENTACE VÝSLEDKŮ

Diameter D [mm]	Length l [mm]	Number of specimens	Shear stress τ - Mean [MPa]	Shear stress τ - St. Deviation
8	10	4	8,39	1,50
8	15	4	9,69	1,74
10	10	7	13,85	2,30
10	15	4	13,48	1,75
10	20	8	15,80	1,06
12	10	3	12,97	0,51
12	15	2	11,35	0,63
12	20	2	13,93	0,63

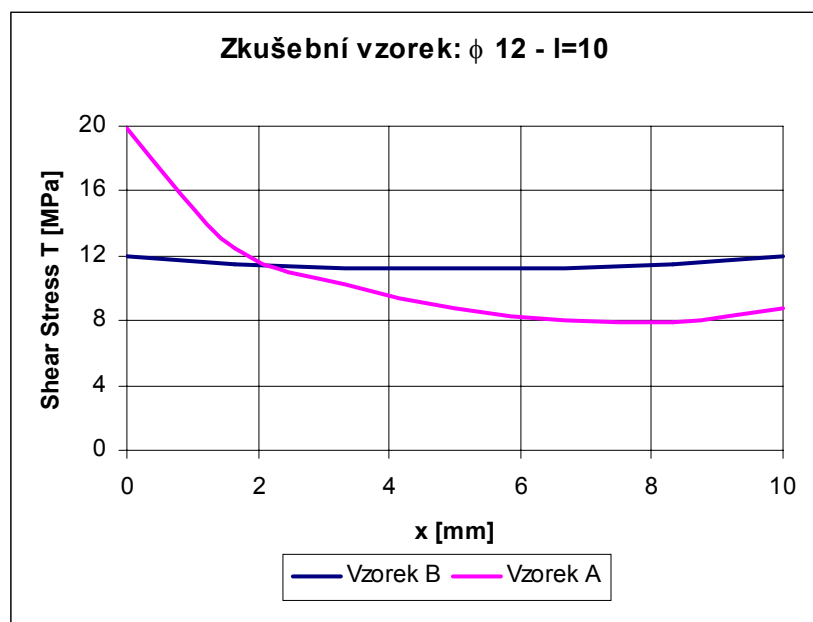
Tab.1: Střední hodnota a směrodatná odchylka mezního smykového napětí τ pro sadu vzorků typu A

Experiment

Experiment byl proveden na několika sadách vzorků typu A podle obr.1, lišících se vzájemně průměrem ocelové kulatiny D a délkou spoje l . V tabulce 1 jsou uvedeny vedle vstupních parametrů střední hodnoty mezního smykového napětí τ a standardní odchylky pro jednotlivé sady vzorků. Počet dosud provedených experimentů je příliš nízký pro vyslovení jednoznačných závěrů. Proto se omezíme na dílčí konstatování. Ani u jednoho průměru vzorků se neprokázala závislost mezi délkou spoje a mezním napětím. Hodnoty mezního napětí určené pro různé průměry vzorků se však významně mezi sebou liší, aniž by vykazovaly jednoznačný trend. Mezi středními hodnotami napětí τ pro průměry 10 a 12 není velký rozdíl, zato u průměru 8 jsou hodnoty τ výrazně nižší, což nepotvrzuje náš předpoklad o konstantní hodnotě smykového napětí u vzorku typu A. Jednou z možných příčin odchylek výsledků mohou však být i rozdílné vlastnosti pryskyřice z různých dávek, použitých pro výrobu jednotlivých sad vzorků. K této domněnce nás vedly pozorovatelné rozdíly mezi vzorky, zhotovenými z různých balení pryskyřice, např. v četnosti a velikosti bublinek nebo průhlednosti pryskyřice. Další příčinou může být jiné rozložení napětí, což nelze vyloučit vzhledem k řádově odlišnému modulu pružnosti epoxidu od pryže, uvažované v původním výpočtovém modelu. Proto bylo provedeno ověření charakteru rozložení smykových napětí na numerickém MKP modelu všech skutečně realizovaných vzorků.

Výpočtové modelování zkoušky krutem

Byly vytvořeny dva numerické modely zkušebních těles, vzorek typu A a typu B, na kterých byla simulována navržená zkušební metoda. Graf.1 znázorňuje průběh smykových napětí podél délky spoje. Z grafu je zřejmé, že průběhy smykového napětí pro daná zkušební tělesa nejsou konstantní, jak jsme předpokládali na základě méně přesného výpočtového modelu s podstatně poddajnějším materiálem matrice. Ani u nově vytvořeného vzorku B, není napětí podél spoje konstantní, ale rozdíly mezi extrémními hodnotami napětí nejsou zdaleka tak velké, jako tomu bylo u odzkoušených vzorků typu A. Rozdíly mezi maximální a minimální hodnotou $\tau_{r\phi}$ v procentech pro jednotlivé vzorky jsou v tabulkách 2,3.



Graf 1: Průběh smykového napětí po délce spoje u vzorků typu A i B

Dimension	1-Tmin/Tmax	Dimension	1-Tmin/Tmax	Dimension	1-Tmin/Tmax
$\phi 8 - 10$	27%	$\phi 10 - 10$	40%	$\phi 12 - 10$	55%
$\phi 8 - 15$	37%	$\phi 10 - 15$	56%	$\phi 12 - 15$	72%
$\phi 8 - 20$	50%	$\phi 10 - 20$	70%	$\phi 12 - 20$	83%

Tab.2: Rozdíly mezi extrémními hodnotami $\tau_{r\phi}$ po délce spoje vzorku typu A

Dimension	1-Tmin/Tmax	Dimension	1-Tmin/Tmax	Dimension	1-Tmin/Tmax
φ8 -10	10%	φ10 -10	8%	φ12 -10	7%
φ8 -15	18%	φ10 -15	14%	φ12 -15	11%
φ8 -20	26%	φ10 -20	20%	φ12 -20	17%

Tab.3: Rozdíly mezi extrémními hodnotami $\tau_{r\phi}$ po délce spoje vzorku typu B

Z grafu 1 a tabulek 2 a 3 je zřejmé, že délka spoje významně ovlivňuje rozdíly v hodnotách napětí po délce spoje. Dále lze konstatovat, že se zvětšující se délkou spojení se zvětšují i rozdíly extrémních napětí a také, že zatížení je přenášeno více na okraji spoje než uprostřed jeho délky. K nerovnoměrnosti napětí na stykové ploše výrazně přispívá podstatně vyšší modul pružnosti „matrice“, než pro jaký byla tato zkouška původně navržena. Modul pružnosti epoxidové pryskyřice je totiž přibližně 1800 MPa, zatímco u pryže se jedná o jednotky MPa. Zatímco při kombinaci ocel-pryž se moduly pružnosti obou materiálů liší o pět řádů a deformace oceli jsou proto zcela zanedbatelné, při použití epoxidové pryskyřice a rozdílu modulů pružnosti pouhých dvou řádů již tomu tak není. Tabulka 4 ukazuje závislost poměru extrémních smykových napětí po délce spoje na modulu pružnosti matrice. Z tabulky je patrné, že deformace ocelové tyče, která tuto nerovnoměrnost vyvolává, je zanedbatelná pro moduly pružnosti matrice zhruba do řádu 10^2 MPa a s jejich zvětšující se hodnotou roste i rozdíl mezi extrémními napětími na stykové ploše.

E [MPa]	1-Tmin/Tmax
E=10	0,04%
E=100	0,40%
E=1000	4%
E=10000	28%

Tab. 4: Rozdíl mezi extrémními hodnotami $\tau_{r\phi}$ pro různé moduly pružnosti matrice. Tyto hodnoty byly spočteny na vzorku typu B o rozměrech φ12 -10. Modul pružnosti ocelové tyče byl 210 000 MPa.

ZÁVĚR

Zkouška dosud nepřinesla očekávané výsledky. Pro realizovaný vzorek typu A ukazují experimenty značnou závislost mezní hodnoty smykového napětí na průměru vzorku. Výpočtové modelování kromě toho naznačuje pravděpodobnou významnou závislost přesnosti zkoušky na poměru modulů pružnosti mezi oběma materiály. Se zvětšující se délkou spoje a zmenšujícím se rozdílem mezi moduly pružnosti obou materiálů roste nerovnoměrnost napětí v kontaktní ploše. Tím dochází k porušení výchozích předpokladů, které se projeví jako chyba při stanovení mezní hodnoty dekoheze. Předpoklady pro lepší výsledky jsou u zkušebního tělesa typu B (obr.2), u něž z výpočtového modelu vychází rozložení napětí podél spoje rovnoměrnější. Tím by bylo možné určit mezní hodnotu dekoheze s menší chybou než je tomu u vzorku typu A. Tento předpoklad je však ještě nutné prověřit experimenty na počtu vzorků dostačujícím k řádnému statistickému vyhodnocení a při potlačení všech vedlejších vlivů.

REFERENCE

[1] J. Burša, Experimental-computational analysis of cohesion tests. Conference Engineering Mechanics, May 2002, Svratka, CR.

Poděkování

Tato práce je součástí výzkumného záměru MŠMT č. CEZ:322/98:262100001.