



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

EXPERIMENTAL-COMPUTATIONAL ANALYSIS OF COHESION TESTS

Jiří Burša¹

***Summary:** The paper compares various types of cohesion tests used in testing of adhesive connection of two materials. The computational modelling using FEM confirms that all the usual or normalized cohesion strength tests result in a pronounced stress concentration in some part of the contact surface of both materials. This concentration disables any evaluation of limit values of quantities crucial for decohesion of the materials and the tests differing in a single geometric parameter of the test sample cannot be compared. The authors suggest torsion tests as more convenient for cohesion strength tests. The computational simulation of the test using hyperelastic FEA showed, that no stress concentration occurs in this type of test and the stress state is homogeneous on all the contact surface. This fact enables a simple evaluation of shear stress in the test. The evaluated limit shear stress should be the material characteristic of the cohesion strength. Some few examples were realized to verify this tests.*

Keywords: Cohesion strength, torsion test, computational modelling, limit state.

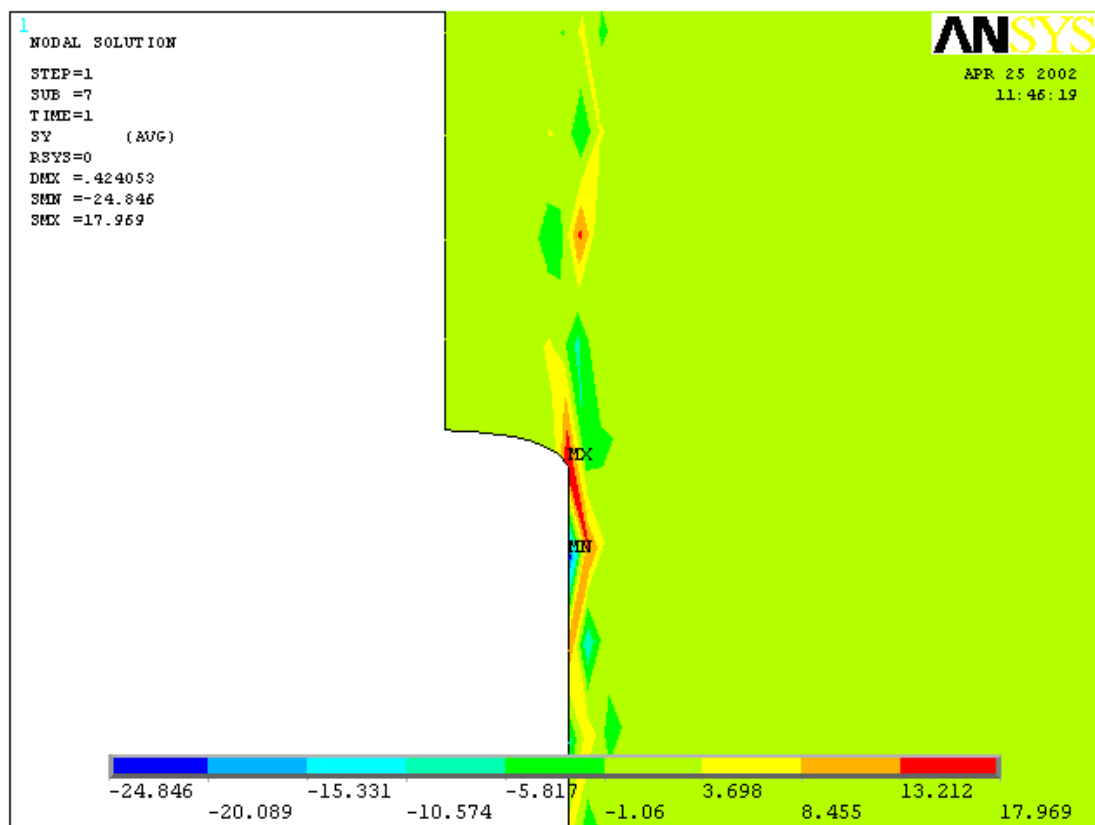
1. Úvod

Výpočtové modelování mezních stavů nehomogenních materiálů, např. vláknových kompozitů, laminátů apod., je podstatně komplikovanější než u materiálů homogenních. Mohou u nich vznikat mezní stavy zcela odlišného charakteru, např. mezní stav soudržnosti spoje (dekoheze), charakterizovaný vznikem trhliny na hranici dvou materiálů. Pro hodnocení tohoto mezního stavu je třeba znát jednak mezní podmínku jeho vzniku a jednak mezní hodnoty příslušných veličin pro dané materiály a technologické provedení spoje. Na základě běžně prováděných zkoušek soudržnosti nelze tyto hodnoty jednoznačně určit, jsou závislé na typu zkoušky i rozměrech vzorku.

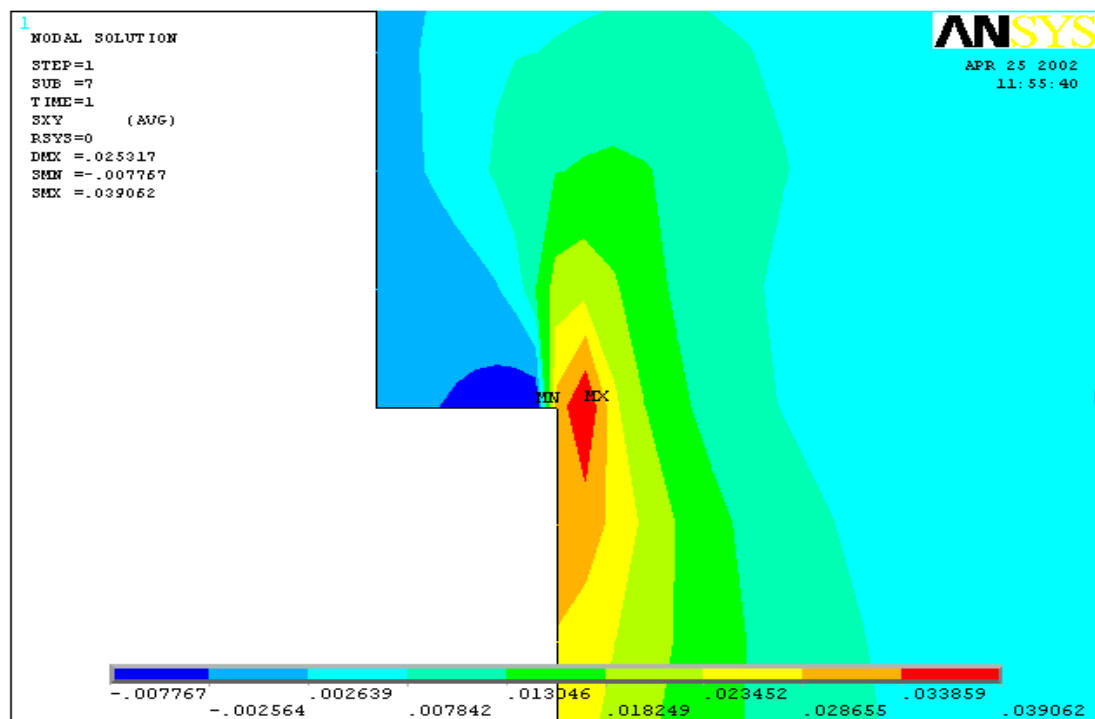
2. Formulace problému

Soudržnost spoje se v praxi zjišťuje různými typy zkoušek. Nejběžnější je vytrhovací zkouška (např. stanovení soudržnosti pryže s ocelovým kordem dle ČSN ISO 5603), při níž je vlákno z jednoho materiálu vytrhováno z bloku jiného materiálu. Jiný typ zkoušky popisuje ČSN 621463 nebo normy ISO 813, 814, 5600. Všem těmto zkouškám je společné nerovnoměrné rozložení napětí v kontaktní ploše obou materiálů s koncentrací napětí v některém místě kontaktní plochy, obzvláště výraznou u materiálů s řádově odlišnými moduly pružnosti, jako jsou pryž a ocel (viz obr.1 a obr.2). Proto nelze jednoduše výpočtově vyhodnotit napětí při porušení, a výsledky zkoušek jsou vyjádřeny v podobě smluvních veličin, tj. sil při porušení, které bývají případně vztaženy na jednotku délky nebo plochy spoje. Tyto hodnoty však neumožňují vzájemné porovnávání různých zkoušek ani v případě zkoušek stejného charakteru, pokud se neshodují jejich všechny podstatné parametry, včetně geometrických. Získané

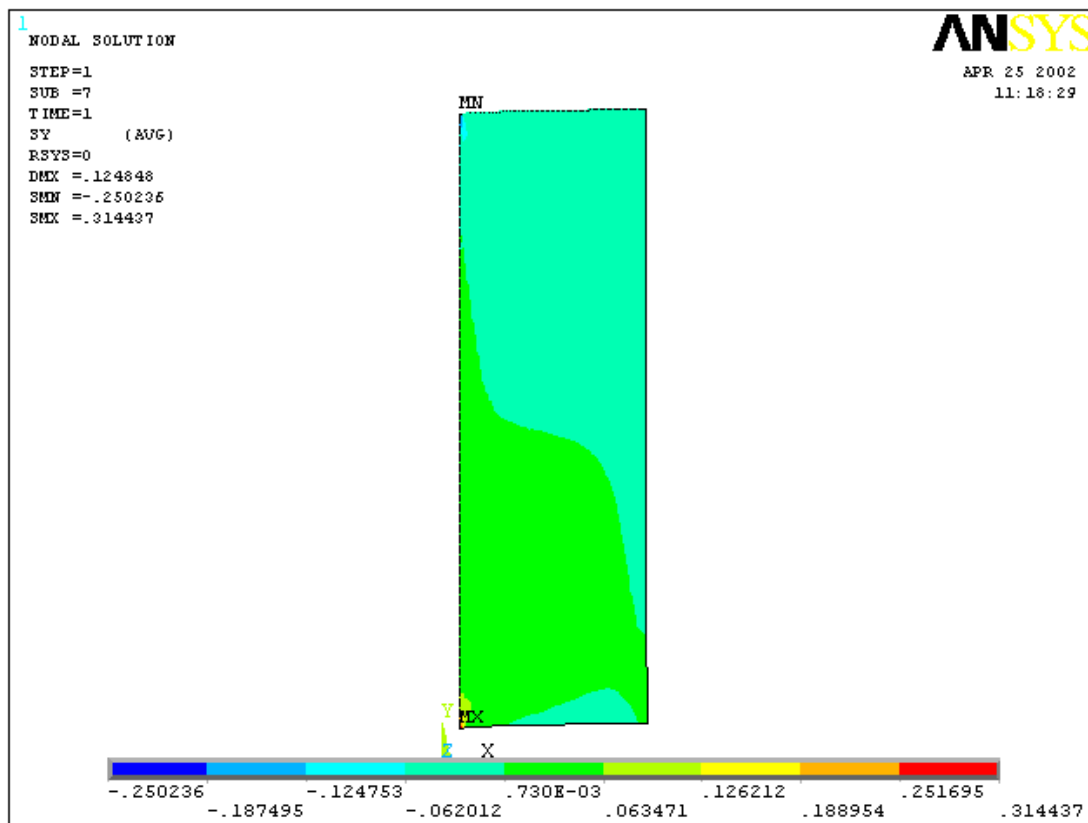
¹ Ing. Jiří Burša, PhD., VUT FSI Brno, Ústav mechaniky těles, Technická 2, 61669 Brno;
tel.: +420.5.41142868, fax: +420.5.41142876; E-Mail: bursa@umtn.fme.vutbr.cz.



Obr.1: Rozložení normálových napětí v axiálním směru v matrici v okolí konce ocelového vlákna (drátu) při vytrhovací zkoušce („pull-out“ testu), model s nespojitostí na čele drátu, s lineárně elastickou matricí s modulem pružnosti v tahu $E=8 \text{ MPa}$.



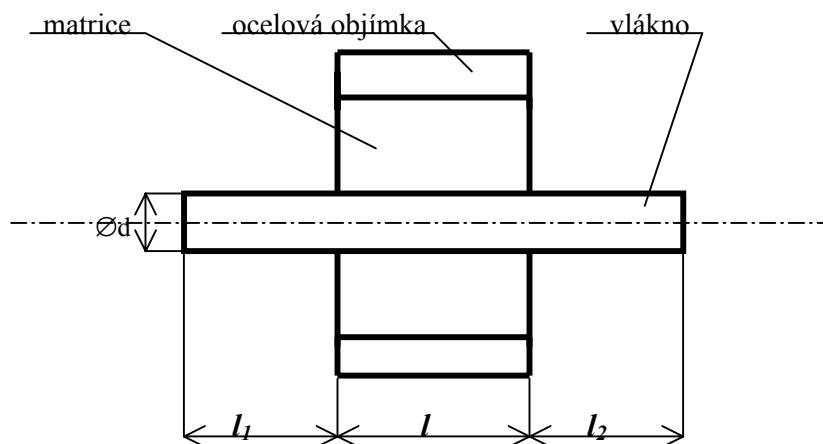
Obr.2: Rozložení smykových napětí v matrici v okolí konce ocelového vlákna (drátu) při vytrhovací zkoušce („pull-out“ testu), model s hyperelastickou matricí s dokonalou vazbou i na čele drátu



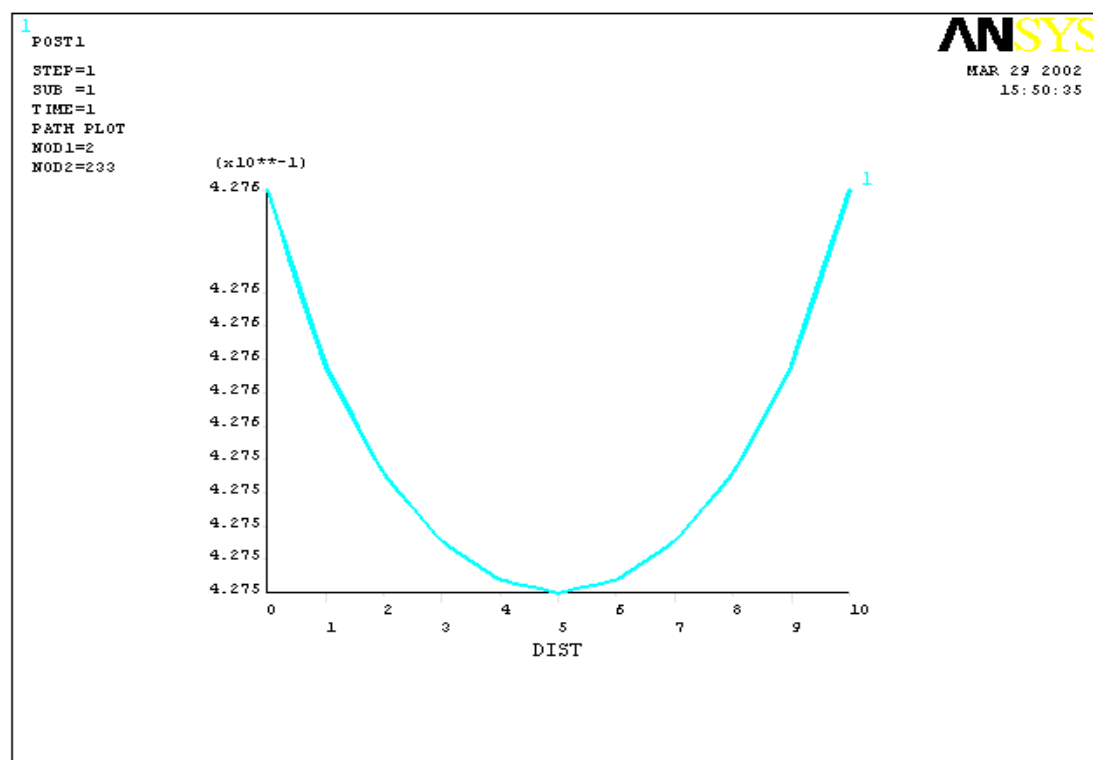
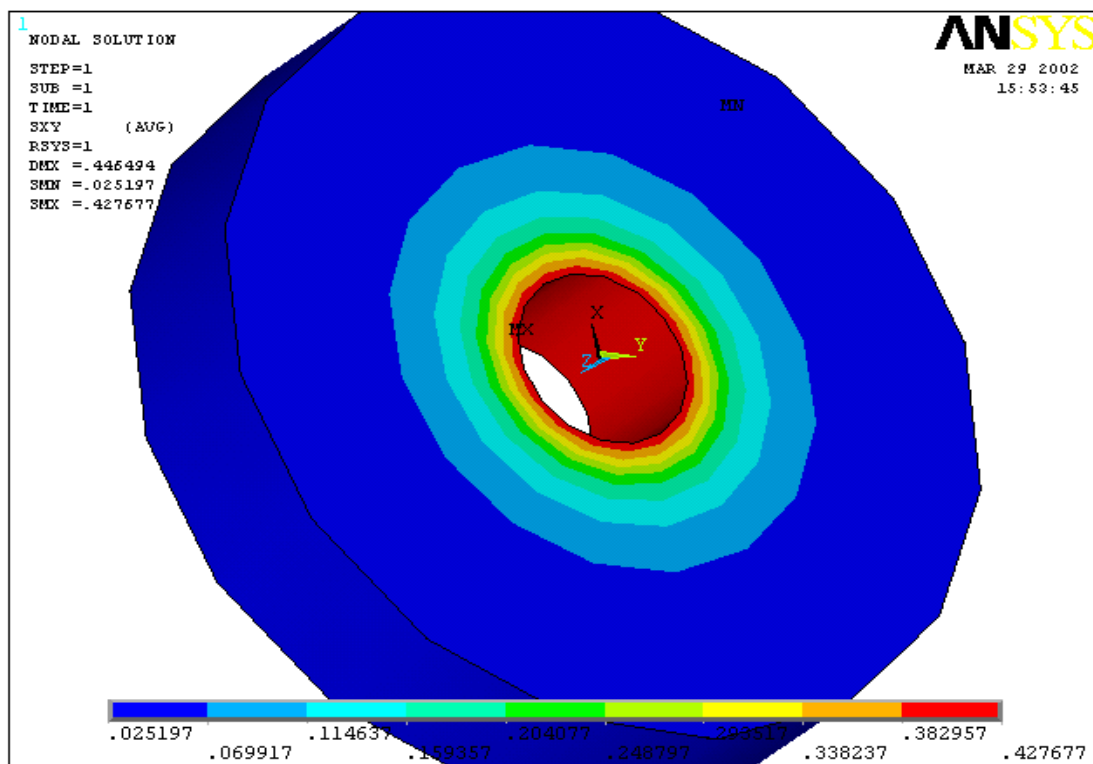
Obr.3: Rozložení normálových napětí v axiálním směru v matrici při vytrhovací zkoušce s průchozím ocelovým vláknem (drátem), model s hyperelastickou matricí

hodnoty rovněž nelze nijak využít při posuzování rizika porušení spoje na základě výpočtového modelování. Proto bylo snahou nalézt takový typ zkoušky, který by tyto nevýhody odstranil.

3. Navržená zkouška krutem



Obr.4: Optimální zkušební těleso pro zkoušku soudržnosti krutem



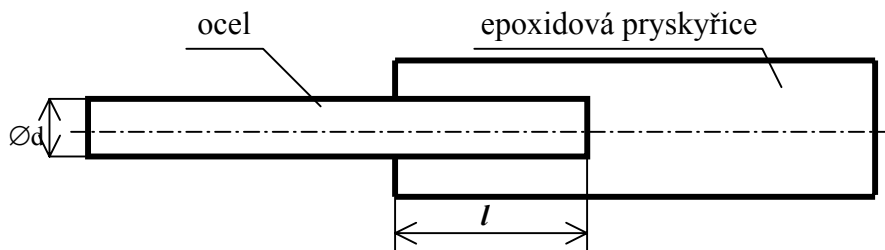
Výpočtové modelování různých typů zkoušek ukázalo jako nejvhodnější zkoušku krutem na tělese podle obr. 4. Na válcové kontaktní ploše je prakticky rovnoměrné rozložení napětí bez jakýchkoli koncentrací (viz obr.5 a obr. 6), takže velikost mezního smykového napětí lze snadno určit ze vztahu

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

v němž M_k znamená krouticí moment při porušení, ostatní veličiny uvádí obr.4. Protože všechny ostatní složky tenzoru napětí jsou při této zkoušce nulové, mohla by velikost smykového napětí určená touto zkouškou být materiálovou charakteristikou, rozhodující o vzniku mezního stavu dekoheze. K potvrzení použitelnosti této zkoušky pro stanovení objektivní hodnoty soudržnosti spoje je však nutné experimentálně potvrdit nezávislost mezní hodnoty napětí na rozměrech vzorku. Mezní stav však je ovlivněn i normálovou složkou napětí na kontaktní ploše, takže pro posuzování komplikovanějších případů napjatosti s využitím výpočtového modelování pak je nutná i složitější mezní podmínka.

Výsledky experimentů a jejich výpočtové modelování

Použitelnost navržené zkoušky pro soudržnost pryže s jinými materiály by bylo třeba ověřit na vzorcích, jejichž výroba je technologicky náročná a zatím se ji nepodařilo zajistit. Podstatnou komplikací je i potřeba vnější ocelové (tedy v porovnání s pryží prakticky nedeformovatelné) objímky, která má zabránit zkreslení výsledků normálovým tlakem na stykové ploše, vyvolaným upnutím vzorku do sklíčidla zkušebního stroje. Proto byly první zkoušky provedeny na vzorcích poněkud odlišného tvaru, vyrobených z oceli a epoxidové pryskyřice (viz obr.7).



Obr. 7: Zkušební těleso použité pro experimenty

Při výrobě jsme se snažili o separaci obou materiálů na čelní ploše ocelového válce, která by snížila systematickou chybu experimentu. Zkoušky byly provedeny na vzorcích o průměru $d=10\text{mm}$ a délkách $l = 10, 20, 30 \text{ mm}$. Výsledky zkoušek byly přepočítány na mezní smykové napětí podle vztahu (1), výsledné střední hodnoty uvádí tabulka 1.

Délka spoje l [mm]	10	20	30	Celkově	Směrodatná odchylka [MPa]
Mezní smykové napětí [MPa]	12,3	14,5	13,2	13,0	1,4

Tab. 1.: Hodnoty soudržnosti spoje naměřené pro různé délky spoje

Výsledky vykazují poměrně značný rozptyl, což může mít několik příčin. Jednak byl dosud proveden malý počet zkoušek, pro délku 30 mm dokonce pouze jediná, protože u většiny vzorků nedošlo k porušení spoje, ale k rozlomení epoxidového tělesa. Vzorky byly vyráběny odléváním pryskyřice, takže reálná délka spoje se od nominální může lišit vlivem působení povrchových napětí. Protože však byl z výrobních důvodů zvolen jiný tvar zkušebního vzorku i jiný materiál matrice, bylo nutné provést podrobnější analýzu rozložení napětí na stykové ploše.

Pro epoxidovou matrici, jejíž modul pružnosti je řádu nikoli jednotek, ale tisíců MPa, již rozdíl v poddajnosti oproti oceli není tak výrazný, aby byly deformace ocelového válce zcela zanedbatelné. Rozložení napětí, odpovídající charakterem obr.6, pak dostaneme jedině tehdy, pokud je ocelový válec zatížen momentem k podélné ose na obou koncích vzorku. I tehdy však extrémní napětí na kontaktní ploše budou záviset na modulu pružnosti matrice, jak udává tabulka 2.

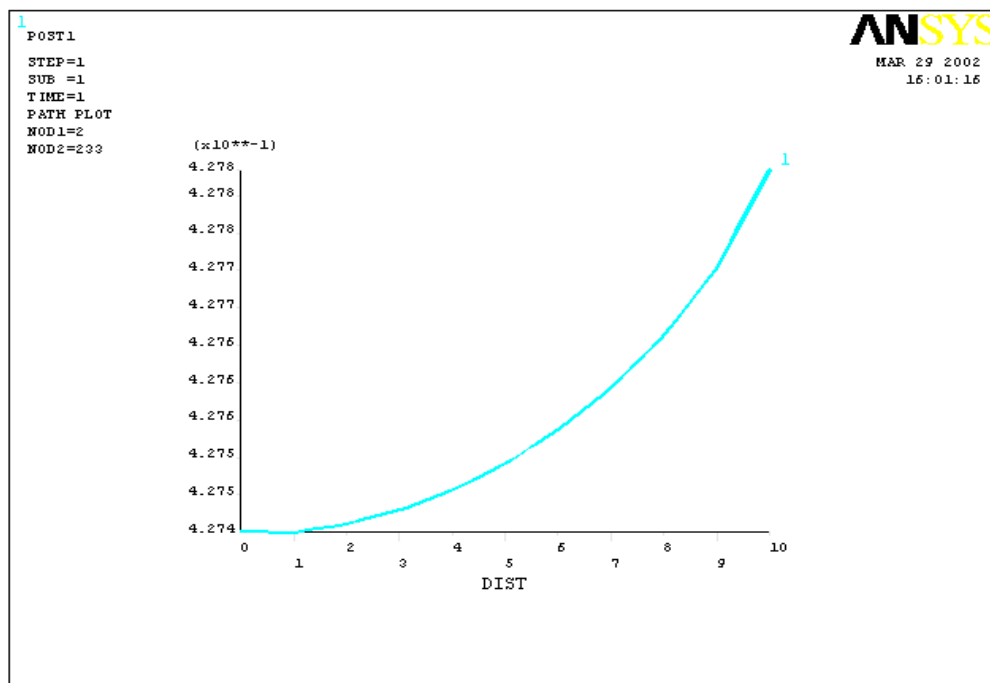
Modul pružnosti matrice [MPa]	8	80	800	1800	8000
$\tau_{\max}/\tau_{\min}$	1,000	1,003	1,033	1,076	1,341

Tab. 2: Poměr extrémních hodnot smykových napětí v kontaktní ploše mezi průchozím ocelovým válcem (zatíženým momenty na obou koncích) a matricí v závislosti na modulu pružnosti matrice

Při zatížení momentem pouze na jednom konci zkušební tyče se vlivem výraznější deformace ocelového válce rozložení napětí změní (viz obr. 8). Poměr extrémních hodnot uvádí tabulka 3. Nerovnoměrnost napětí se ještě poněkud zvýší, pokud ocelový válec nepřesahuje přes okraj matrice oboustranně (tj. $l_2=0$, viz obr.1).

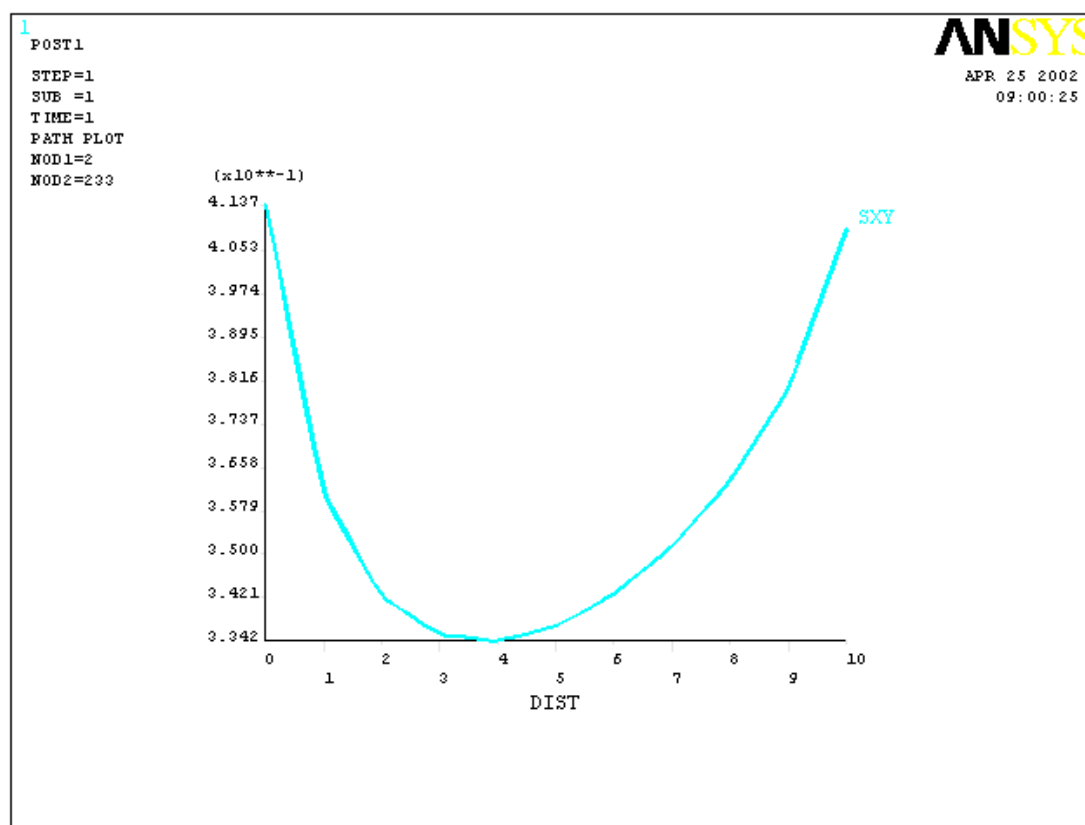
Modul pružnosti matrice [MPa]	8	80	800	1800	8000
$\tau_{\max}/\tau_{\min}$	1,001	1,010	1,105	1,241	2,167

Tab. 3: Poměr extrémních hodnot smykových napětí v kontaktní ploše mezi průchozím ocelovým válcem (zatíženým momentem na jednom konci) a matricí v závislosti na modulu pružnosti matrice



Obr.8: Rozložení smykových napětí v matrici po délce kontaktní plochy při zkoušce krutem s průchozím válcem zatíženým momentem na jedné straně, model s modulem pružnosti matrice $E=8$ MPa

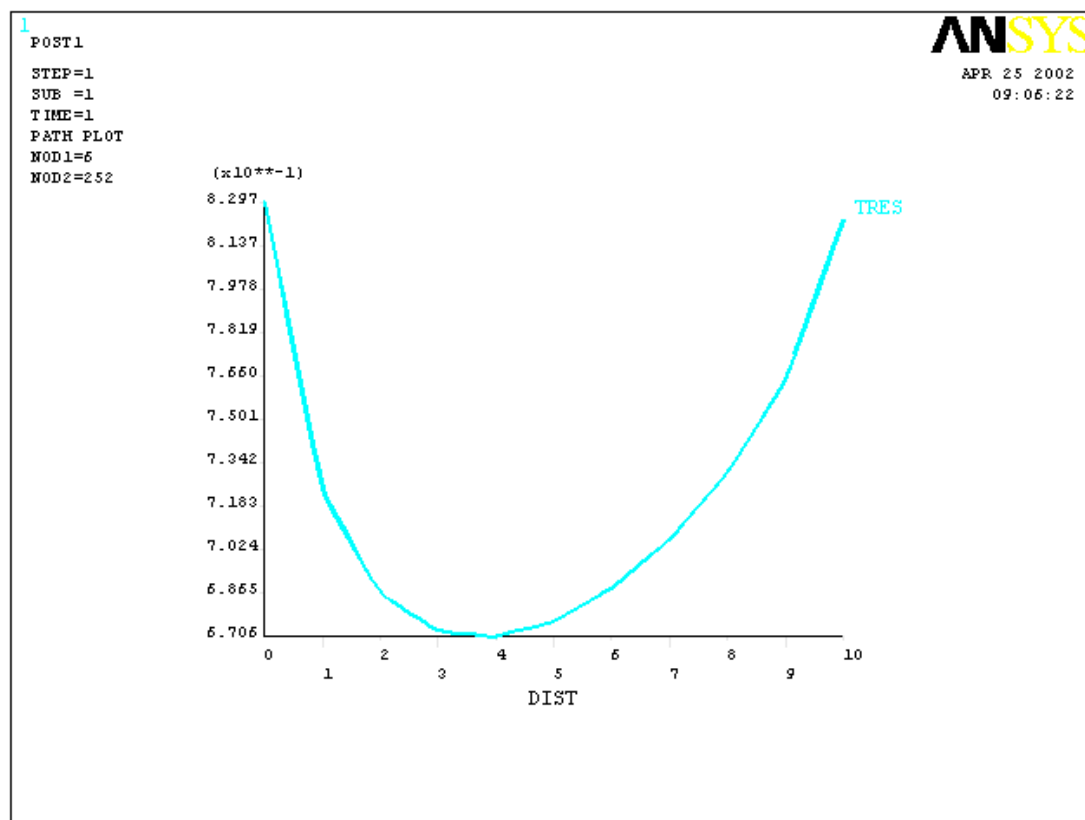
Pro zkušební vzorky podle obr.7, které byly použity v experimentech, dává výpočtové modelování (s modulem pružnosti epoxidové matrice $E=1800$ MPa) rozložení smykových napětí τ_{rt} v kontaktní ploše podle obr. 9. Výrazný pokles napětí v blízkosti konce ocelového válce je způsoben změnou směru smykového napětí, které se natáčí ze směru obvodového do axiálního. Protože normálová napětí jsou prakticky nulová, lze skutečný průběh smykových napětí lépe vystihnout pomocí redukovaného napětí. Obr. 10 ukazuje, že tím jsou jednoznačně a věrohodně definovány extrémní hodnoty napětí v kontaktní ploše, jejich poměr pro různé moduly pružnosti matrice uvádí tabulka 4. Z jejich vyhodnocení je zřejmé, že nerovnoměrnost rozložení napětí v kontaktní ploše s rostoucím modulem pružnosti matrice výrazněji narůstá až pro velmi tuhé matrice ($E>1800$ MPa). Lze vyslovit předpoklad, že relativní chyba mezní hodnoty smykového napětí určeného z experimentu na tomto vzorku bude srovnatelná s relativní odchylkou maximálního smykového napětí na kontaktní ploše vůči jeho střední hodnotě. S tím korespondují i výsledky dosud provedených experimentů, pro ověření tohoto předpokladu je však nutný jejich podstatně větší počet.



Obr.9: Rozložení smykových napětí [MPa] v matrici po délce kontaktní plochy při zkoušce krutem realizované na tělese podle obr.7.

Modul pružnosti matrice [MPa]	8	80	800	1800 (epoxy)	8000
$\sigma_{redmax}/\sigma_{redmin}$	1,228	1,215	1,208	1,227	2,373

Tab. 4: Poměr extrémních hodnot redukovaných napětí (podle Trescovy podmínky plasticity) v kontaktní ploše mezi ocelovým válcem a matricí u zkušební tělesa podle obr.7 v závislosti na modulem pružnosti matrice.



Obr.10: Rozložení redukovaných napětí [MPa] podle Trescovy podmínky plasticity v matici po délce kontaktní plochy při zkoušce krutem realizované na tělese podle obr.7.

Závěr

Výsledky výpočtového modelování ukazují, že zkouška krutem je schopna poskytnout věrohodnou mezní hodnotu soudržnosti spoje dvou materiálů. Malý počet dosud provedených experimentů ukazuje, že výsledná hodnota mezního smykového napětí je velmi málo závislá na rozměrech vzorku a mohla by být materiálovou charakteristikou, použitelnou pro výpočtové modelování mezního stavu dekoheze. Pro jednoznačný závěr je třeba provést větší počet experimentů a rovněž porovnat různé tvary vzorků pro zkoušku krutem. Výsledky výpočtového modelování naznačují, že navrhované zkoušky soudržnosti jsou vhodné pro materiály s výrazně rozdílnými moduly pružnosti (rozdíl alespoň dvou řádů). U nich lze při vhodné volbě geometrie a způsobu zatěžování zkušební tělesa dosáhnout vysoké přesnosti výsledků zkoušky díky velmi rovnoměrnému rozložení napětí na kontaktní ploše.

Literatura

- [1] Burša J., Pešlová F., Janíček P.: Evaluation of fatigue tests of fiber composites undergoing large deformations. Conference Engineering mechanics 2000, Svratka, Vol. IV, pp.75-80.
- [2] Burša, Reinisch, Pešlová, Janíček: Experimental-computational analysis of adhesion and fracture in composite "rubber-steel wire". Engineering Mechanics 2001, Svratka, , pp. 44-45.

**Práce byla provedena v rámci Výzkumného záměru MŠMT
č.CEZ:322/98:262100001**