

NUMERICAL ANALYSIS OF A SURFACE CRACK IN PROTECTIVE LAYERS

L. Šestáková*, Z. Majer*, L. Náhlík**, Z. Knésl**

Summary: *Two elastic plane strain problems relevant to the cracking of protective layers bonded to dissimilar semi-infinite substrate materials are solved. In the first case a crack initiated at the free surface of the layer and propagating within the film is considered and the influence of its original orientation on cracking mode of the layer is studied. The second problem is that of the crack in the layer oriented perpendicularly to the layer/substrate interface and its influence on a debonding of the layer/substrate system is analysed. In both cases the influence of elastic mismatch of both components on the crack behaviour is discussed. The results provide the details making it possible to solve practical problems connected with damage of bodies with protective layers.*

1. Úvod

Používání ochranných vrstev zvyšuje odolnost konstrukcí proti mechanickému, tepelnému a chemickému poškození. Jako příklad uveďme používání keramických povlaků s velkou tvrdostí a odolností proti vysokoteplotní korozi při ochraně materiálů pracujících při extrémních podmínkách. V mnoha případech dochází k poškození ochranné povrchové vrstvy, které může mít za následek ztrátu její funkčnosti. V celé řadě případů je příčinou porušování ochranné vrstvy existence trhlin, které vznikají na volném povrchu ochranné vrstvy a během provozu součásti se šíří ve vrstvě. Takové trhliny mohou být iniciovány z počátečních vrypů, které obvykle vznikají na volném povrchu při opracování součásti nebo během provozu součásti. Počáteční geometrie vrypu může odpovídat (mikro)trhlině, případně vrubu. V obou případech se jedná o koncentrátor napětí. Trhlina, iniciující se v okolí počátečního defektu v důsledku velké koncentrace napětí, se během provozu šíří v ochranné vrstvě. V závislosti na počáteční orientaci startovacího vrypu, geometrii tělesa, způsobu namáhání a materiálu obou složek (tj. vrstvy a podkladu), se trhlina šíří buď směrem k rozhraní nebo může měnit směr šíření a v konečné fázi se dostává opět na volný povrch vrstvy, viz. obr. 1a.

V případě, kdy se trhlina zastaví na rozhraní vrstva-podklad se může dále šířit buď podél rozhraní a tak vyvolat delaminaci vrstvy a rozhraní, může se „odrazit“ od rozhraní zpět do vrstvy nebo se může šířit dále do podkladu a v konečné fázi může vyvolat porušení celé součásti. V druhém případě, kdy se trhlina šíří ve vrstvě a v konečné fázi vystupuje na povrch,

* Lucie Šestáková, Zdeněk Majer: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2; 616 69 Brno

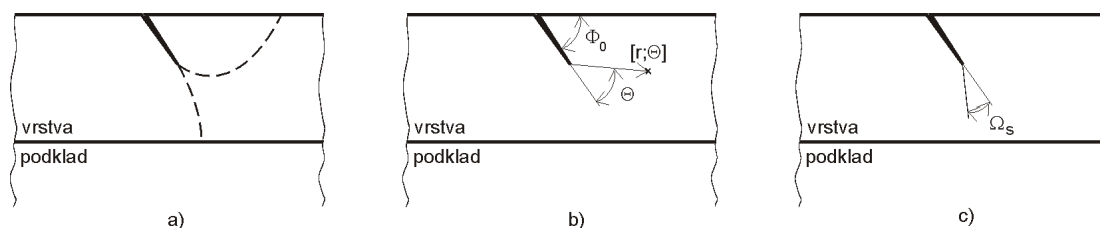
** Ing. Luboš Náhlík, Ph.D., prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc.: Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky; Žitkova 22; 616 62 Brno; tel.: +420.532 290 358; e-mail: knesl@ipm.cz

dochází k vylamování materiálu vrstvy a tím ke snížení jejího ochranného účinku. V obou případech dochází rovněž ke snížení estetického působení povrchové vrstvy. Z praktického hlediska je obvykle nejvíce nebezpečný případ, kdy se trhлина šíří přes celou tloušťku vrstvy a vytváří konfiguraci s vrcholem na rozhraní mezi oběma materiály. Tento případ, vzhledem ke své důležitosti, je podrobně rozepsán v pracích (Knésl et al., 1998; Náhlík, 2002), kde je poukázáno na vliv materiálových parametrů vrstvy a podkladu na kritické napětí pro šíření trhliny do podkladu. Odhady kritického napětí založené na standardních postupech lomové mechaniky jsou v tomto případě nedostačující a pro výpočet kritického napětí je nutno uvážit i změnu exponentu singularity napětí vyvolanou rozdílností materiálových parametrů vrstvy a ochranného podkladu. Zejména v případě, kdy je povrchová vrstva vytvořena z materiálu s vyšší hodnotou Youngova modulu pružnosti než u podkladu, dochází v důsledku tohoto rozdílu k poklesu hodnoty kritického napětí pro poškození podkladu. Zanedbání této skutečnosti může vést k neočekávanému lomu součásti se všemi nepříjemnými následky.

V příspěvku jsou v rámci předpokladů lineární elastické lomové mechaniky řešeny dva okruhy problémů související s problematikou poškození ochranných povrchových vrstev. V prvním případě se jedná o stanovení způsobu porušení vrstvy vyvolaného šířením trhliny z počátečního povrchového vrypu (příp. vrubu). Pro tento účel je počáteční defekt modelován jako trhлина, která je zadána svou délkou a orientací vzhledem k volnému povrchu (viz. obr.1b). V závislosti na počáteční konfiguraci trhliny a materiálových parametrech obou složek je v příspěvku stanoven směr jejího dalšího šíření.

V druhém případě se jedná o analýzu napětového pole pro trhlinu šířící se kolmo z volného povrchu vrstvy směrem k rozhraní. Přitom se předpokládá, že trhлина se šíří v normálovém módu. V závislosti na délce trhliny a materiálových parametrech ochranné vrstvy a podkladu je vypočteno jednak rozložení napětí v okolí vrcholu trhliny (je charakterizováno odpovídající hodnotou faktoru intenzity K_I) a jednak hodnoty tahových a smykových pnutí v rozhraní. Cílem těchto výpočtů je popsat vliv materiálových parametrů na možnou delaminaci vrstvy a podkladu vyvolanou napětím, které je iniciováno existencí uvažované trhliny, případně rozhodnout, zda se šířící trhлина zastaví na rozhraní obou složek.

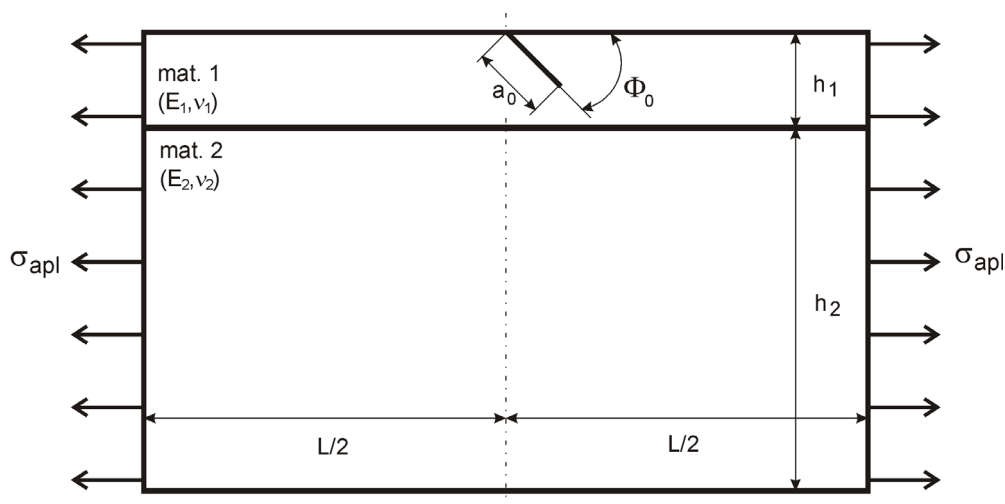
Výsledky umožňují rozhodnout, o jaký následný typ porušení soustavy vrstva-podklad se může v daném případě jednat a jak zvolit materiál vrstvy, aby docházelo co k nejmenším nežádoucím poškozením.



Obr.1 Základní způsoby porušování povrchové vrstvy a použité označení.

2. Numerický model

Pro výpočty byl použit model tělesa s povrchovou vrstvou dle obr.2. Byla zvolena povrchová vrstva tloušťky $h_1 = 1$ mm na masivním podkladu tloušťky $h_2 = 50$ mm. Délka tělesa byla zvolena $L = 300$ mm. Počáteční trhlina byla určena délkou a_0 a její orientace úhlem Φ_0 . Těleso bylo namáháno napětím $\sigma_{appl} = 100$ MPa působícím rovnoběžně s rozhraním. V případě trhliny šířící se kolmo na rozhraní ($\Phi_0 = \pi/2$) se jedná o normálový mód namáhání, tj. $K_{II} = 0$, obecně je trhlina namáhána kombinovaným normálovým a smykovým namáháním a základní lomově-mechanické veličiny jsou veličiny K_I a K_{II} . Materiál vrstvy byl charakterizován hodnotou Youngova modulu E_1 a Poissonova čísla μ_1 (resp. hodnotou E_2 a μ_2 pro podklad). Pro každou zvolenou konfiguraci určenou veličinami (a_0 , Φ_0) byly stanoveny hodnoty faktoru intenzity napětí K_I a K_{II} v závislosti na hodnotě poměru E_1/E_2 (byly zvoleny hodnoty 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5 a 10). Hodnoty K_I a K_{II} byly určeny pro všechny kombinace uvažovaných počátečních délek trhlin a_0 (0,1 mm, 0,3 mm, 0,5 mm, 0,7 mm, 0,9 mm) a orientací trhliny Φ_0 (20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80°). Hodnoty Poissonova čísla byly uvažovány v obou materiálech stejné. Při výpočtu předpokládáme dokonalou adhezi mezi vrstvou a podkladem.



Obr.2 Použitý numerický model. Tloušťka povrchové vrstvy $h_1 = 1$ mm, tloušťka podkladu $h_2 = 50$ mm, délka vzorku $L = 300$ mm (poznamenejme, že obrázek není uveden v odpovídajícím měřítku). Při výpočtu předpokládáme aproximaci rovinné deformace.

Pro výpočet hodnot napětí v studovaném tělese byl použit komerční systém metody konečných prvků ANSYS (ANSYS, 2002) a hodnoty faktoru intenzity napětí K_I a K_{II} byly stanoveny pomocí standardní procedury KCALC implementované v tomto systému (viz (Šestáková, 2006; Majer, 2006) pro podrobnosti).

V případě trhliny kolmé k rozhraní byla navíc věnována pozornost rozdělení tahové a smykové složky napětí v rozhraní obou materiálů s cílem posoudit možnost delaminace vrstvy a podkladu působením napětí vyvolaných existencí sledované trhliny v povrchové vrstvě. Všechny výpočty byly provedeny v rámci platnosti předpokladů (jednoparametrové) lineární elastické lomové mechaniky (LELM).

Směr šíření trhliny v povrchové vrstvě byl stanoven na základě kritéria maximálního tangenciálního napětí (MTS kritérium), které se používá často zejména pro jeho jednoduchost a jeho platnost byla doložena řadou experimentů, např. (Anderson, 1995). Podle tohoto kritéria se trhlina bude šířit v radiálním směru $\Theta = \Omega_S$, ve kterém je hodnota odpovídající složky tangenciálního napětí $\sigma_{\Theta\Theta}$ maximální. Pro stanovení směru šíření trhliny pak platí:

$$\Omega_S = \arccos\left(\frac{3K_{II}^2 + K_I\sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2}\right) \quad (1)$$

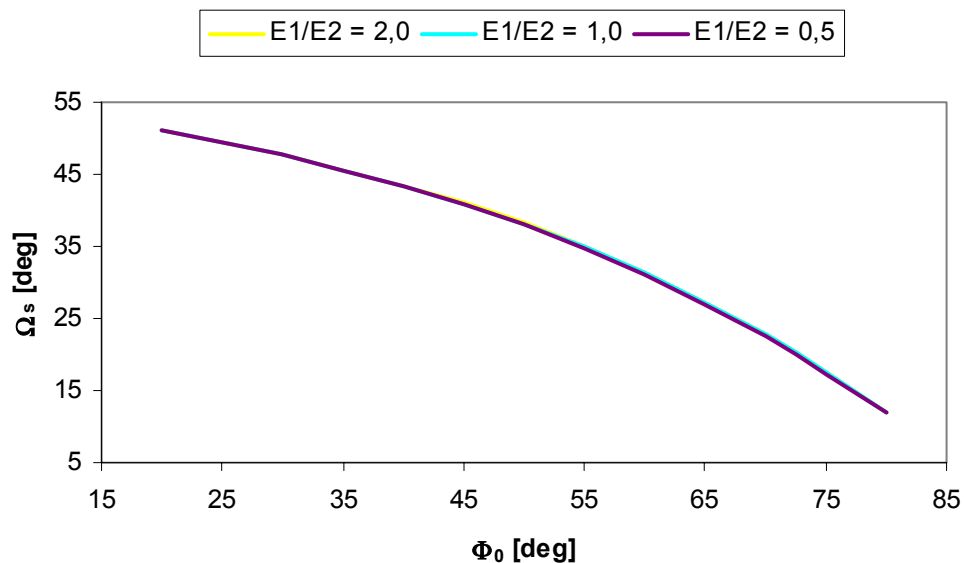
Poznamenejme, že při aplikaci procedury KCALC (systém ANSYS) nelze přímo stanovit znaménko veličiny K_{II} . Protože znaménko u smykové složky faktoru intenzity napětí K_{II} je rozhodující pro stanovení znaménka úhlu Ω_S , byla současně provedena vždy i analýza složek vektoru posuvů v okolí vrcholu trhliny. Pro použitá označení odpovídá záporná hodnota K_{II} kladné hodnotě Ω_S .

3.1. Numerické výsledky

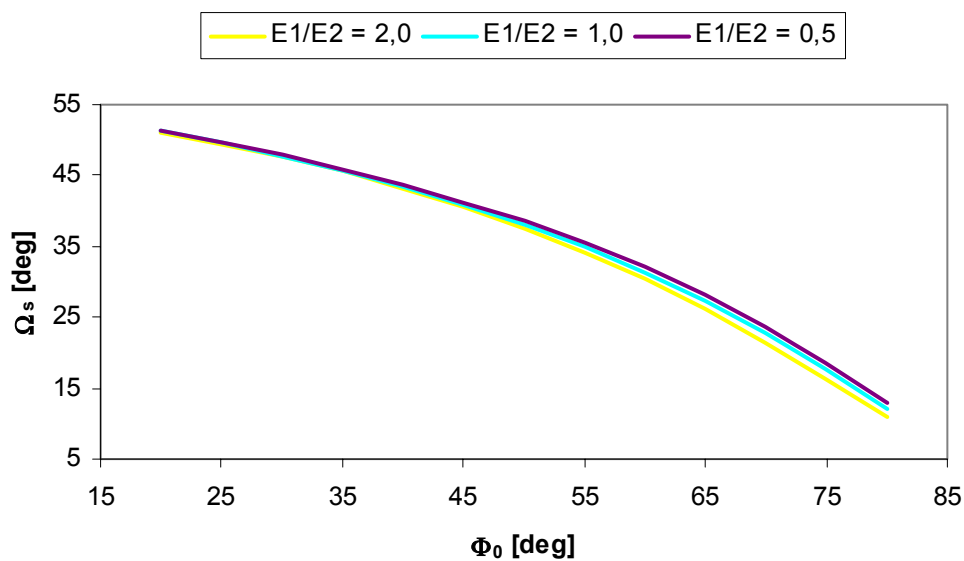
V této části jsou uvedeny pro ilustraci vybrané výsledky provedených výpočtů. Další výsledky lze nalézt v (Šestáková, 2006; Majer, 2006). Všechny výsledky se vztahují ke geometrii a zatížení podle obr.2., což modeluje tenkou povrchovou vrstvu na masivním podkladu. Označení odpovídá symbolice uvedené na obr.1b,c. Z důvodu jednoduchosti uvádíme hodnotu Ω_S jako kladnou.

3.1.1. Směr šíření trhliny

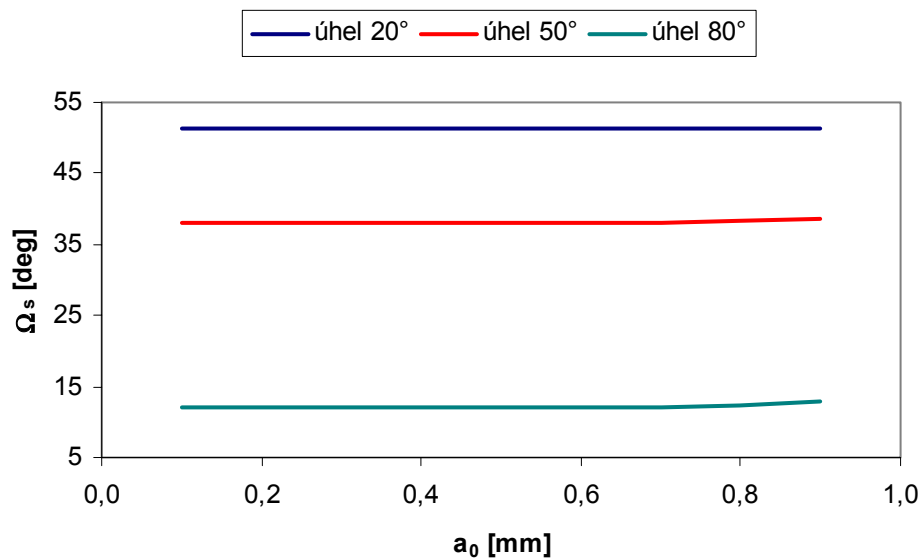
Pro hodnoty počáteční velikosti a orientace trhliny uvedené v kapitole 2 byly vypočteny hodnoty K_I a K_{II} pro uvedené hodnoty poměrů E_1/E_2 . Na základě získaných výsledků byl pak určen úhel Ω_S (viz obr.1c) a tím i směr, ve kterém se bude trhlina dále šířit. Vybrané typické výsledky jsou uvedeny na obr.3 a 4.



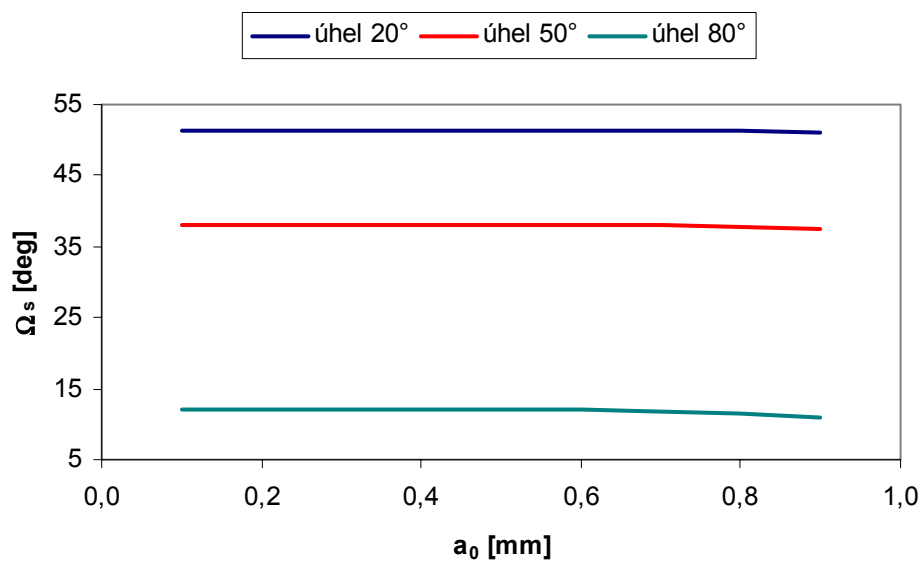
Obr.3a Závislost směru šíření Ω_S na orientaci počáteční trhliny dané úhlem Φ_0 pro případ počáteční délky $a_0 = 0,5$ mm. Jednotlivé křivky pro $E_1/E_2 = 0,5, 1,0$ a $2,0$ splývají.



Obr.3b Závislost směru šíření Ω_S na orientaci počáteční trhliny dané úhlem Φ_0 pro případ počáteční délky $a_0 = 0,9$ mm a hodnoty $E_1/E_2 = 0,5, 1,0$ a $2,0$.



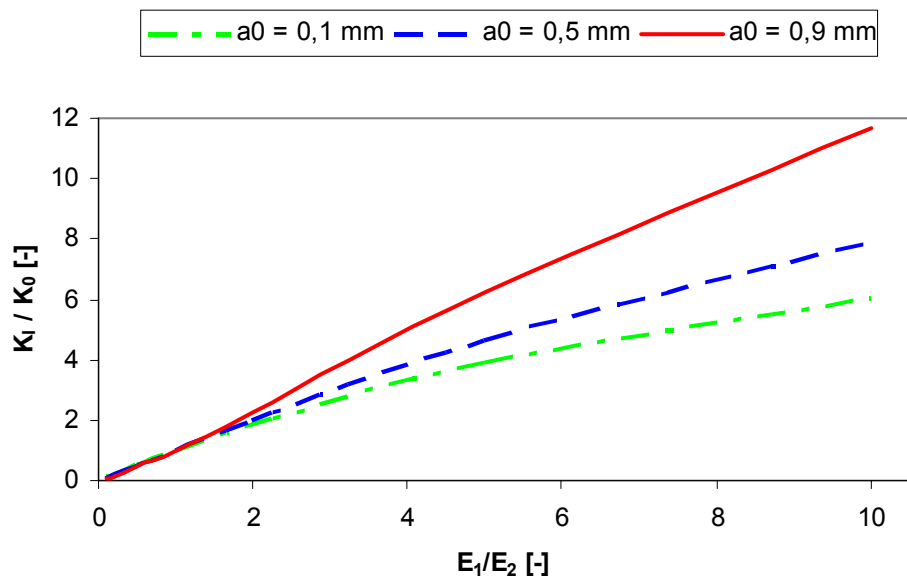
Obr.4a Závislost směru šíření Ω_s na počáteční délce trhliny a_0 pro vybrané hodnoty počáteční orientace Φ_0 a poměr $E_1/E_2 = 0,5$.



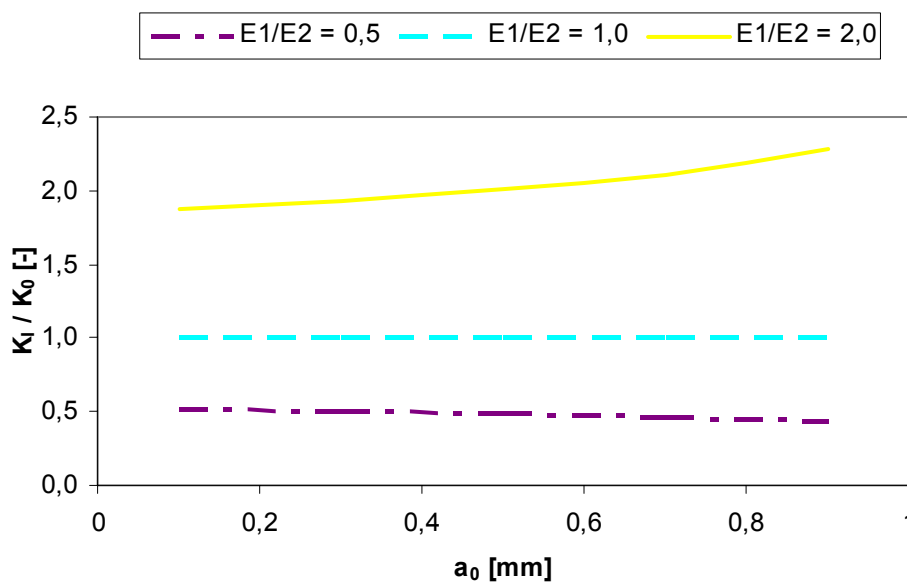
Obr.4b Závislost směru šíření Ω_s na počáteční délce trhliny a_0 pro vybrané hodnoty počáteční orientace Φ_0 a poměr $E_1/E_2 = 2,0$.

3.1.2. Trhlina kolmá k rozhraní

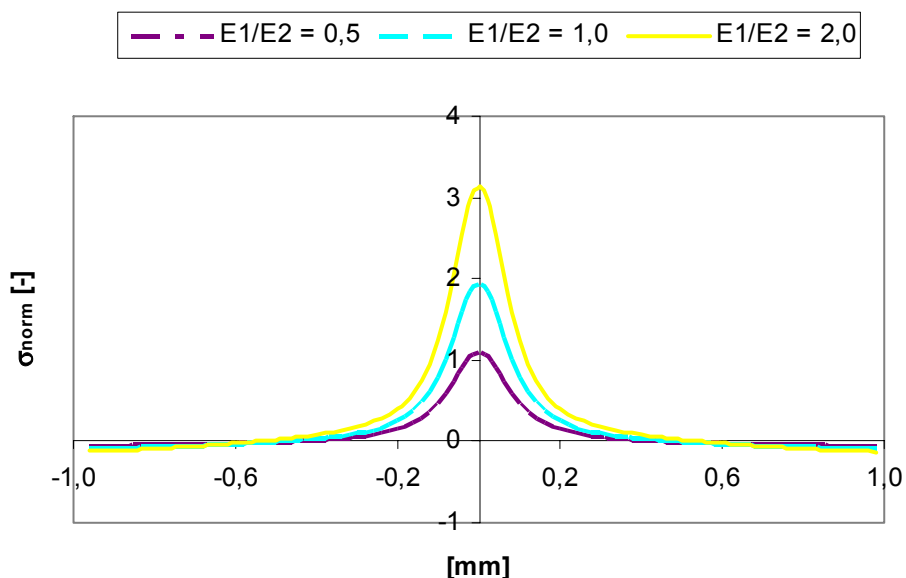
Vzhledem ke způsobu namáhání vzorku a uvažované konfiguraci (trhlina kolmá na rozhraní) je chování trhliny v rámci uvedených předpokladů popsáno hodnotou složky faktoru intenzity K_I odpovídající normálovému namáhání. Byl analyzován zejména vliv rozdílů materiálových parametrů vrstvy a podkladu na hodnotu K_I pro různé počáteční délky trhliny a_0 . Následně pak byly stanoveny hodnoty smykového a tahového napětí vznikající v důsledku existence sledované trhliny na rozhraní. Typické výsledky jsou uvedeny na obr.5 a 6.



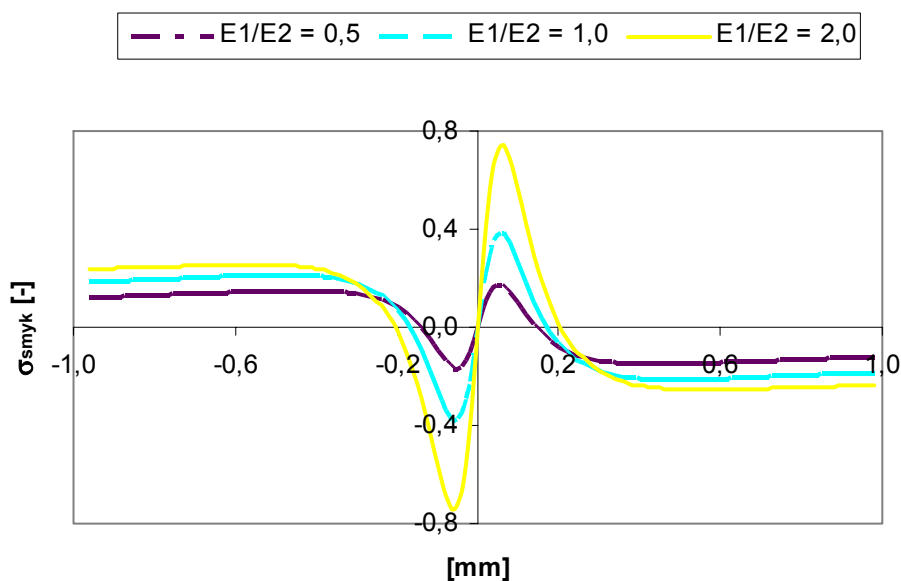
Obr.5a Závislost normované hodnoty faktoru intenzity napětí K_I/K_0 na hodnotách poměru E_1/E_2 pro vybrané hodnoty a_0 počáteční délky trhliny. K_0 odpovídá hodnotě faktoru intenzity napětí pro stejnou konfiguraci v homogenním případě.



Obr.5b Závislost normované hodnoty faktoru intenzity napětí K_I/K_0 na velikosti počáteční délky trhliny a_0 pro vybrané hodnoty poměru E_1/E_2 . K_0 odpovídá hodnotě faktoru intenzity napětí pro stejnou konfiguraci v homogenním případě.



Obr.6a Závislost složky normálového napětí σ_{norm} na velikosti počáteční délky trhliny a_0 pro vybrané hodnoty poměru E_1/E_2 . Napětí je normováno hodnotou $\sigma_{appl} = 100$ MPa.



Obr.6b Závislost složky tečného napětí σ_{smyk} na velikosti počáteční délky trhliny a_0 pro vybrané hodnoty poměru E_1/E_2 . Napětí je normováno hodnotou $\sigma_{appl} = 100$ MPa.

4. Diskuse

Analýza chování trhliny v nehomogenním prostředí je nezbytná pro lepší pochopení procesů porušování materiálově složených těles a přináší zajímavé poznatky i z hlediska teorie lomové mechaniky. V příspěvku byla řešena problematika šíření trhliny v tenké povrchové vrstvě na masivním podkladu. Za určitých zjednodušujících předpokladů (zejména ideální adheze mezi oběma materiály) bylo modelováno v rámci lineární elastické lomové mechaniky chování

trhliny v povrchové vrstvě. Přitom předpokládáme existenci počáteční trhliny, která může vzniknout např. v důsledku použité technologie při přípravě vrstvy, při opracování tělesa s povrchovou vrstvou, nešetrným zacházením při montáži apod. Vzhledem k tomu, že pro porušení konstrukce s ochranou vrstvou může být rozhodující šíření trhliny přes rozhraní do podkladu, je otázka, jak takové trhliny vznikají, pro posouzení funkčnosti konstrukce klíčová. Základní módy porušování ochranné vrstvy jsou schematicky uvedeny na obr.1a. V případě, kdy se trhlina odchýlí od svého původního směru a šíří se směrem k volnému povrchu, může dojít k vylamování částí povrchové vrstvy a její funkčnost (nejen z estetického hlediska) je narušena. Z hlediska bezpečnosti provozu konstrukce je závažnější případ, kdy se trhlina šíří směrem k rozhraní a v konečné fázi zůstane zakotvena na rozhraní vrstva-podklad. Za předpokladu, že materiál povrchové vrstvy má vyšší hodnotu Youngova modulu pružnosti než podklad, dochází ke snížení kritického napětí pro šíření trhliny do masivu a může dojít k neočekávanému porušení celé konstrukce.

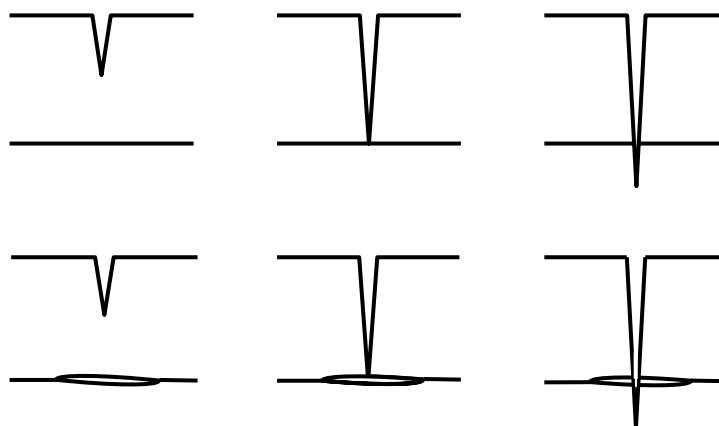
Cílem příspěvku bylo analyzovat podmínky, které jsou určující pro způsob šíření trhliny vyvolané v povrchové vrstvě existencí počátečního vrypu (modelovaného jako počáteční trhlina) a které rozhodují o výsledné konfiguraci. V literatuře se obvykle uvádí, např. (Menčík, 1996), že trhlina, která se blíží rozhraní dvou materiálů se bude stáčet k rozhraní (a v konečné fázi se bude k rozhraní šířit kolmo) v případě, kdy je tuhost prvního materiálu (vyjádřená pomocí hodnoty Youngova modulu pružnosti E) větší než tuhost materiálu, do kterého se trhlina šíří. V opačném případě se trhlina začne stáčet do směru rovnoběžného s rozhraním a případně se šířit směrem k volnému povrchu. Toto tvrzení však neplatí obecně. Výsledné chování záleží navíc na okrajových podmínkách (zejména způsobu zatěžování tělesa) a je silně ovlivněno geometrií bi-materiálového tělesa. V případě tenkých vrstev na masivním substrátu (a to je případ studovaný v tomto příspěvku) se ukazuje, že pro směr šíření trhliny v povrchové vrstvě nejsou rozhodující materiálové vlastnosti obou složek, ale spíše tloušťka povrchové vrstvy ve srovnání s rozměrem podkladu. Tyto závěry lze dokumentovat na obr.3 a 4.

Z obr.3, kde je uvedena závislost směru šíření Ω_S na orientaci počáteční trhliny dané úhlem Φ_0 pro dvě počáteční délky $a_0 = 0,5$ mm a $a_0 = 0,9$ mm je patrné, že hodnoty materiálových vlastností obou komponent prakticky směr šíření trhliny neovlivňují. Pro analýzu byl volen rozsah poměrů $E_1/E_2 = 0,5, 1,0$ a $2,0$, se kterými se v praxi můžeme nejčastěji setkat. Výsledky pro extrémnější hodnoty poměru E_1/E_2 uvedené v (Šestáková, 2006; Majer, 2006) ukazují, že i pro extrémnější hodnoty $E_1/E_2 = 0,1$ příp. $10,0$ zůstává toto tvrzení v podstatě v platnosti. Na obr.4 jsou uvedeny závislosti směru šíření Ω_S na počáteční délce trhliny a_0 pro vybrané hodnoty počáteční orientace Φ_0 a poměr $E_1/E_2 = 0,5$. Rozhodující veličinou pro směr šíření trhliny je zde její počáteční orientace. Závislost na délce trhliny je zanedbatelná a výsledky pro různé poměry materiálových vlastností E_1/E_2 jsou prakticky identické. Lze tedy na základě uvedených výsledků konstatovat, že pro danou geometrickou konfiguraci (tenká povrchová vrstva, masivní podklad) se budou trhliny iniciované počátečním defektem (vrypem, trhlinou) šířit vždy směrem k rozhraní a to bez ohledu na materiálové vlastnosti vrstvy a podkladu. Toto tvrzení odporuje závěrům získaným pro bi-materiálová tělesa složená se dvou částí se srovnatelnou tloušťkou. Tento zdánlivý rozpor lze snadno vysvětlit vezmeme-li v úvahu skutečnost, že trhlina se šíří vždy tak, aby byl minimalizován smykový mód namáhání, tj. stáčí se tak, aby se šířila kolmo na směr hlavního napětí. V případě tenké povrchové vrstvy, na rozdíl od zmíněného bi-materiálového tělesa, však směr hlavního napětí není prakticky změnou materiálových parametrů vrstvy a podkladu ovlivněn. Poznamenejme, že uvažujeme reálné hodnoty materiálových parametrů. V případě

extrémních hodnot je nutno závěry jistě modifikovat. Významným faktorem, který může podstatně modifikovat získané výsledky, je způsob zatěžování tělesa a trhliny. Ve sledovaném případě jsme modelovali vnější zatěžování vzorku tak, že odpovídá tahovému namáhání tělesa upevněného na koncích v čelistech zkušebního stroje. V případě, kdy bude zatěžování tělesa realizováno např. bodovými silami působícími na volném povrchu trhliny, budou výsledky podstatně odlišné.

Závěrem této části lze však konstatovat, že pro uvažovaný model tenké ochranné povrchové vrstvy na masivním podkladu a pro modelované zatížení se bude, a to bez ohledu na materiálové složení, trhlina stáčet vždy směrem kolmo k rozhraní a to bez ohledu na materiálové parametry.

S ohledem na výše uvedené závěry bylo dále analyzováno šíření trhliny kolmé na rozhraní, tj. byly provedeny výpočty pro úhel $\Phi_0 = \pi/2$. Ostatní parametry (délka, materiálové hodnoty) byly stejné jako v předchozím případě. Vzhledem k tomu, že se jedná o normálové namáhání, je řídicí veličinou hodnota faktoru intenzity napětí K_I . Jednotlivé možné konfigurace trhliny jsou uvedeny na obr.7. I v tomto případě byly výpočty provedeny za předpokladu ideální adheze mezi vrstvou a rozhraním. Poznamenejme, že tento předpoklad lze akceptovat i v případě, kdy je vazba mezi rozhraním a vrstvou konečná, a to pokud odpovídající napětí v rozhraní nepřekročí kritickou hodnotu pro delaminaci.



Obr.7 Možné způsoby delaminace povrchové vrstvy a podkladu vyvolané existencí trhliny šířící se kolmo k rozhraní.

Z rozsáhlých výpočtů týkajících se této konfigurace (viz (Šestáková, 2006; Majer, 2006) pro podrobnosti) uveďme pouze dva typické výsledky. Na obr.5a je uvedena závislost normované velikosti faktoru intenzity napětí K_I (hodnoty jsou normovány velikostí faktoru intenzity napětí odpovídající stejné geometrii a homogennímu tělesu) na poměru materiálových vlastností vrstvy a podkladu E_1/E_2 pro tři typické velikosti počáteční trhliny. Ve všech případech dochází k nárůstu normovaných hodnot K_I s růstem podílu E_1/E_2 . Z praktického hlediska jsou zajímavé výsledky týkající se poměrů $1 < E_1/E_2 \leq 2$. Zvýšená tuhost povrchové vrstvy vyvolává zvýšení hodnot faktoru intenzity napětí K_I a tím i urychluje rychlost růstu trhliny směrem k rozhraní. Na obr.5b jsou uvedeny analogické výsledky v závislosti na délce počáteční trhliny. Existence trhliny šířící se kolmo k rozhraní vyvolává v rozhraní normálová a smyková napětí, která mohou, v závislosti na mechanismu porušení, vyvolat delaminaci vrstvy a podkladu. Důsledkem tohoto jevu pak bude šíření trhliny podél

rozhraní. Hodnoty těchto napětí jsou uvedeny na obr.6a,b. Je patrné, že zvýšení poměru E_1/E_2 vede ke zvýšení hodnot jak normálového tak i smykového napětí a tím zvyšuje pravděpodobnost porušení soustavy vrstva-podklad šířením trhliny podél rozhraní.

5. Závěr

V příspěvku je ukázáno, že základní charakteristikou určující šíření trhliny v tenkých povrchových vrstvách je tendence stáčení trhliny směrem k rozhraní. Vzhledem ke specifickým podmínkám studovaného tělesa (geometrie, zatěžování) není tato tendence prakticky ovlivněna změnou materiálových parametrů povrchové vrstvy a masivního podkladu. Základní mechanismus porušování modelovaných povrchových vrstev bude tedy spojen s šířením trhliny kolmo k rozhraní.

6. Poděkování:

Výsledky byly získány s finanční podporou grantu GA ČR 101/05/0320.

7. Literatura

- Anderson, T.L. (1995) *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. Second edition, CRC Press, London.
- (2004) *ANSYS Release 8.0 Documentation*. Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania.
- Knésl Z., Knápek A. & Bednář K. (1998) Evaluation of the critical stress in bonded materials with a crack perpendicular to the interface. *Proc. Int. Conf. Surface Modification Technologies XI*. (T. S. Sudarshan, M. Jeandin & K. A. Khor eds), The Institute of Metals, London, 153-159.
- Majer, Z. (2006) Numerická analýza růstu povrchové trhliny v ochranných vrstvách. *Diplomová práce*, FSI VUT v Brně, ÚFM AV ČR, Brno.
- Menčík, J. (1996) *Mechanics of Components with Treated or Coated Surfaces*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Náhlík, L.(2002) Šíření únavových trhlin v okolí rozhraní dvou elastických materiálů. *Disertační práce*, FSI VUT v Brně, ÚFM AV ČR, Brno.
- Šestáková, L. (2006) Vliv povrchových trhlin na delaminaci povrchové vrstvy a substrátu. *Diplomová práce*, FSI VUT v Brně, ÚFM AV ČR, Brno.