

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálového inženýrství

Ing. Alice Chlupová

**ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ
LAMINÁTOVÝCH KOMPOZITŮ
FATIGUE BEHAVIOUR
OF LAMINATE COMPOSITES**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: RNDr. Alois Vašek, CSc., ÚFM AV ČR Brno

Konzultanti: Prof. RNDr. Jaroslav Polák, DrSc., ÚFM AV ČR Brno
Doc. RNDr. Bohumil Vlach, CSc., VUT FSI Brno

Oponenti: RNDr. Luděk Kunz, CSc., ÚFM AV ČR Brno
Doc. Ing. Josef Klement, CSc., VUT FSI Brno
Prof. Ing. Ivan Dvořák, CSc., VA Brno

Datum obhajoby: 31. 10. 2001

KLÍČOVÁ SLOVA

únava, vlákno-kovové lamináty, GLARE, iniciace trhlin, šíření trhlin, delaminace, vliv přemostřujících vláken, faktor intenzity napětí,

KEY WORDS

fatigue, fiber-metal laminates, GLARE, crack initiation, crack propagation, delamination, fiber bridging effect, stress intensity factor

Disertační práce je uložena na odd. vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

© 2001 Alice Chlupová

ISBN 80-214-2018-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	CÍLE PRÁCE	5
3	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	5
3.1	MATERIÁL, VÝROBA A VLASTNOSTI	5
3.2	ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ	6
3.2.1	<i>Iniciace a šíření trhlin</i>	6
3.2.2	<i>Delaminace</i>	6
3.3	VLIV VRUBU	7
3.4	FAKTOR INTENZITY NAPĚTÍ	7
3.4.1	<i>K-faktor pro dlouhé trhliny</i>	7
3.4.2	<i>K-faktor pro krátké trhliny rostoucí z vrubu</i>	8
3.5	KOMBINOVANÉ NAMÁHÁNÍ	9
4	EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA	9
4.1	MATERIÁL	9
4.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	9
4.3	ZATĚŽOVÁNÍ	10
4.4	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	10
5	VÝSLEDKY A DISKUSE	11
5.1	INICIACE A ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN	11
5.1.1	<i>Mechanismus iniciace</i>	11
5.1.2	<i>Místo iniciace a směr šíření trhlin</i>	12
5.1.3	<i>Počet cyklů do iniciace</i>	12
5.1.4	<i>Množství a délka únavových trhlin</i>	13
5.1.5	<i>Šíření trhlin</i>	14
5.1.6	<i>Delaminace</i>	16
5.1.7	<i>Únavová životnost</i>	17
5.2	FAKTOR INTENZITY NAPĚTÍ	17
5.2.1	<i>Příklad výpočtu</i>	18
5.2.2	<i>Stanovení vlivu vláken</i>	19
5.3	KOMBINOVANÉ NAMÁHÁNÍ	20
5.3.1	<i>Iniciace trhlin</i>	20
5.3.2	<i>Šíření trhlin</i>	21
6	ZÁVĚRY	22
7	LITERATURA	23
	PUBLIKACE	25
	RESUME	26
	CURRICULUM VITAE	27

1 ÚVOD

Předkládaná disertační práce se zabývá hodnocením mechanických vlastností při cyklickém zatěžování zkušebních těles vyrobených z vlákno-kovových laminátů typu GLARE. Nízká specifická hmotnost společně s dobrou únavovou odolností a odolností proti poškození staví tento hybridní laminát do pozice konkurenta tradičních leteckých materiálů.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem disertační práce je rozšířit vědomosti o únavových vlastnostech vrubovaných desek vyrobených z laminátu typu GLARE. Dílčí cíle jsou zaměřeny především na studium iniciace a počátečního šíření únavových trhlin a delaminace, na nalezení křivek životnosti, na posouzení vlivu vláken na faktor intenzity napětí a na studium vlivu kombinovaného zatížení na únavové vlastnosti laminátů.

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

3.1 Materiál, výroba a vlastnosti

Vlákno-kovové lamináty GLARE jsou složeny z kovových plechů (ze slitiny hliníku 2024-T3) prokládaných vrstvami skleněných vláken (s objemovým podílem 50 až 60%) uložených v matrici z epoxidové pryskyřice (tzv. prepreg). Jednotlivé typy se liší uspořádáním vláken. [1,2,3]

U vlákno-kovových laminátů se strukturní anizotropií závisí vlastnosti na směru působícího zatěžování. Mez pevnosti a únavová odolnost laminátů zatěžovaných ve směru vláken výrazně převyšují vlastnosti Al slitiny 2024-T3, mez kluzu laminátu a použité Al slitiny je srovnatelná [4,5]. Materiál GLARE má relativně vysokou odolnost proti průrazu [6], dobrou odolnost proti korozi a prohoření a dobré tepelně izolační vlastnosti [7]. Možnosti dílenského zpracování jsou srovnatelné s Al slitinami. Použitím laminátů se dosáhne až 25% úspory hmotnosti součásti nebo konstrukce [4], což spolu s vysokou životností má za následek snížení provozních nákladů a nákladů na údržbu. Mezi nedostatky lze (ve srovnání s Al slitinou) zařadit nižší tuhost a houževnatost, vyšší kilogramovou cenu a zejména pak malý rozsah databáze materiálových vlastností, která by usnadňovala návrh nových konstrukčních dílů.

3.2 Únavové chování

3.2.1 Iniclace a šíření trhlin

Modely pro jednotlivá stádia únavového procesu v laminátech dosud nejsou popsány tak důkladně, jak je tomu u kovů. Jak ve stádiu iniciace, tak ve stádiu šíření trhlin lze nalézt určité rozdíly mezi chováním homogenních kovových materiálů a vlákno-kovových laminátů.

Dosud byla největší pozornost věnována především stádiu šíření dlouhých trhlin v rozměrných tenkostěnných aplikacích, kde se výrazně projevuje brzdící účinek zpevňujících vláken [8,9]. U laminátů typu GLARE je trhlinka v jednotlivých kovových vrstvách oddělena neporušenými vrstvami prepregu s vlákny. Prepregová vrstva slouží jako bariéra, která přemostuje únavové trhliny, brání jejich otírání a tím snižuje rychlost jejich růstu a prodlužuje stádium šíření [10,11].

Práce zaměřené na chování laminátů ve stadiu iniciace trhlin nejsou tak časté, nicméně studium počátečních stádií nabývá na významu, neboť životnost malých součástí je dána délkou stadia iniciace trhliny a kinetikou jejího počátečního růstu [12,13]. V laminátu trhliny iniciují ve vnitřních vrstvách, na rozhraní kov-prepreg a to na více místech najednou.

Posouzení brzdícího účinku vláken na rychlost trhlin v počátečních stádiích únavového procesu bylo dosud studováno jen omezeně [14,15]. Totéž lze říci o delaminaci, která doprovází iniciaci a šíření trhlin v laminátech.

3.2.2 Delaminace

Poškozením rozhraní jednotlivých vrstev v laminátech typu GLARE, které závisí především na kvalitě adheze, se doposud mnoho prací nezabývalo. Přitom delaminace určité velikosti je nevyhnutelná a vytváří optimální podmínky pro vynikající odolnost proti šíření únavové trhliny.

Delaminace může vznikat buď při výrobě [16] nebo při provozu součásti [17,18]. Velikost delaminace z výroby se dá ovlivnit volbou výrobních podmínek. Provozní delaminace vznikají jako důsledek kumulace poškození při zatěžování. Vznik a růst delaminace na rozhraní kov-prepreg souvisí s iniciací a růstem únavové trhliny v kovových vrstvách a se smykovou deformací povrchové vrstvy adheziva ochuzené o zpevňující vlákna.

3.3 Vliv vrubu

Vliv vrubu na statickou pevnost laminátů s aramidovými a uhlíkovými vlákny byl studován např. v [20,21]. Studium vlivu vrubu na únavové chování materiálu GLARE se však doposud mnoho prací nezabývalo [22,23].

Pro predikci únavové životnosti těles s vruby je důležité znát vztah mezi nominálním napětím a lokálním napětím v místě vrubu, tzn. teoretický součinitel koncentrace napětí K_t [19]. Anizotropie vlastností komplikuje stanovení součinitele koncentrace napětí pro laminát. V práci [1] byl stanoven model výpočtu součinitele K_t pro vruby v nekonečné desce z laminátu GLARE. Na základě tohoto modelu byl v práci [24] proveden výpočet hodnot K_t pro tělesa s různými vruby a různým vrstvením. Ze srovnání hodnot K_t pro izotropní materiál a laminát vyplývá, že u anizotropních materiálů dochází ke zvýšení součinitele K_t (v závislosti na typu vrubu a tloušťce materiálu až o 14%).

3.4 Faktor intenzity napětí

3.4.1 K-faktor pro dlouhé trhliny

Růst trhlín v kompozitech je dán faktorem intenzity napětí na čele trhliny. Pro anizotropní materiál se ovšem musí provést určité korekce neboť K -faktor charakterizuje intenzitu cyklického napěťového pole v blízkosti čela trhliny v homogenních izotropních materiálech. Tato extrapolace pro laminát může být problematická, neboť je třeba zahrnout vliv složitějšího spolupůsobení mnoha faktorů.

V práci [1] byl publikován jednoduchý model pro přibližné stanovení faktoru intenzity napětí na čele trhliny v nekonečné desce z laminátu GLARE se zahrnutím vlivu přemostujících vláken.

Kvantitativní analytická metoda pro přesnější výpočet K -faktoru v materiálu ARALL byla v práci [25] odvozena pro plochá zkušební tělesa s centrálním zářezem délky 2,6 mm a s vrstvením laminátu 4/3. Ve výpočtu bylo zohledněno únavové zatížení, napětí od přemostujících vláken, délka trhliny a rozsah delaminace, smykové napětí adheziva na povrchu prepregu, geometrie zkušebního tělesa, úroveň zbytkového pnutí po vytvrzování atd. Z uvedených vlivů patří mezi nejdůležitější vliv delaminace a vliv smykové deformace adheziva.

Na základě metody uvedené v práci [25] byla v disertační práci provedena modifikace výpočtu faktoru intenzity napětí pro případ materiálu GLARE 2 a těleso

s trhlinou rostoucí z centrálního otvoru o průměru 15 mm. Postup je rozdělen na několik kroků a stručně byl publikován v práci [26].

- stanovení základních geometrických parametrů tělesa
- stanovení napětí v jednotlivých vrstvách laminátu,
- výpočet K -faktoru laminátu se zahrnutím vlivu vláken a delaminace,
- stanovení vlivu oblasti s přerušenými vlákny a konečné šířky tělesa,
- zahrnutí zbytkového pnutí v laminátu do výpočtu K -faktoru,
- zahrnutí vlivu smykové deformace lepidla na K -faktor.

Výsledný vztah pro výpočet K -faktoru v kovových vrstvách laminátu je:

$$K_{fin} = K_{r,Al} + K_{ad} \quad (2.1)$$

kde $K_{r,Al}$ je faktor intenzity napětí se zahrnutím vlivu vláken, delaminace, velikosti vrubu a zbytkového pnutí a K_{ad} je faktor intenzity napětí se zahrnutím vlivu smykové deformace adheziva.

3.4.2 K-faktor pro krátké trhliny rostoucí z vrubu

Trhlina rostoucí z kořene vrubu je v počátku svého šíření výrazně ovlivněna koncentrací napětí ve vrubu [27,28,29]. Po dosažení určité délky trhliny (označené jako tranzitní délka trhliny a_{tr}) klesá vliv vrubu a rychlost růstu pak závisí na napětí na čele trhliny. K -faktor trhliny přesahující délku a_{tr} rostoucí z kořene vrubu o velikosti $2s$ je dán vztahem:

$$K_l = \sigma_{nom} \sqrt{\pi(s+a)} \quad (2.2)$$

V ostatních případech ($a < a_{tr}$) je potřeba lokální zvýšení napětí v místě vrubu brát v úvahu a faktor intenzity napětí vyjádřit počítat dle rovnice:

$$K_s = CK_t \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

Parametr C je geometrická funkce, pro kterou lze v dostupné literatuře nalézt různé vztahy jako např. pro trhliny v kořenech eliptického vrubu v nekonečné desce [28]:

$$C = 1,1215 - 3,12(a/r) + 5,16(a/r)^{1,5} - 3,73(a/r)^2 + 1,14(a/r)^{2,5} \quad (2.4)$$

Stanovení faktoru intenzity napětí laminátu GLARE s krátkou trhlinou rostoucí z centrálního vrubu nebylo v dostupné literatuře dosud publikováno. Pro výpočet K -faktoru v kovových vrstvách laminátu je potřeba nominální napětí σ_{nom} nahradit

efektivním napětím σ_{eff} , které zahrnuje různé vlivy působící na trhlinu (tj. vliv vláken, delaminace, konečné šířky tělesa, vliv vrubu a smykové deformace lepidla atd.):

$$\sigma_{eff} = K_{fin} / \sqrt{\pi l}, \quad (2.5)$$

tzn. na základě znalosti výsledného K -faktoru v kovových vrstvách laminátu.

3.5 Kombinované namáhání

U nýtovaného spoje iniciují první únavové trhliny v místech otvorů pro nýt na styku dvou spojovaných desek. Tato místa nezávisí na materiálu, ale jsou dána namáháním nýtovaného spoje, tj. zejména kombinací tahového a ohybového napětí. [30,31]. Vlivem cyklického kombinovaného namáhání na šíření únavových trhlin v nýtovaných spojích homogenních materiálů se zabývala např. práce [31]. Stejným vlivem na iniciaci a počáteční růst únavových trhlin ve vlákno-kovových laminátech typu GLARE se však v dostupné literatuře doposud nikdo nezabýval.

4 EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA

4.1 Materiál

Materiál GLARE, který vyrobila a dodala TU Delft v Holandsku, je vyroben vrstvením 0,3 mm tlustých plechů ze slitiny 2024-T3 a 0,25 mm tlustých prepregů se skleněnými vlákny. Pro experimenty byly vybrány dva typy laminátu s rozdílným uspořádáním vláken (jednosměrné - GLARE 2, překřížené - GLARE 3). Pro srovnání byly některé testy provedeny také na tělesech ze slitiny 2024-T3 o tloušťce 1,4 mm.

4.2 Zkušební tělesa

Plochá tělesa typu 1 byla vyrobena z materiálu GLARE 2. Rozměry těles byly: šířka 50 mm, délka 210 mm, tloušťka: $t = 1,4; 3,1$ a $6,5$ mm (tj. vrstvení 3/2, 6/5 a 12/11). Tělesa byla opatřena vruby s hodnotou součinitele koncentrace napětí: $K_t = 1,2$ pro dva mělké stranové vruby; 2,4 pro centrální kruhový otvor a 3,2 pro oválný centrální vrub. U těchto těles byl studován vliv geometrie vrubu a tloušťky laminátu na iniciaci a šíření povrchových trhlin a únavová degradace a životnost.

Pro plochá tělesa typu 2 byl zvolen materiál GLARE 2. Speciální tvar a rozměry těles byly dány zatěžovacím zařízením: šířka 35 mm, délka 67 mm a tloušťka 1,4 mm (tj. vrstvení 3/2). Tělesa byla opatřena stranovými vruby s hodnotou součinitele koncentrace napětí $K_t = 1,2$. U těles typu 2 byl při zatěžování pozorován

kořen vrubu na boční straně tělesa s cílem stanovit mechanismus iniciace trhlin a jejich počátečního šíření na okraji vnitřních vrstev laminátu.

Plochá zkušební tělesa typu 3 byla vyrobena z laminátu GLARE 3. Rozměry těles: šířka 40 mm, délka 300 mm a tloušťka 1,4 mm (tj. vrstvení 3/2). Tělesa byla v centrální části opatřena otvorem o průměru 4,8 mm ($K_t = 2,6$). Byla vyrobena tělesa bez přeplátování a tělesa symetricky přeplátovaná (s vyosením střední části). Přeplátováním ($e = 0$) a vlepením distančního mezikusu ($e = 1$ nebo 2 mm) se dosáhlo různého vyosení, které má za následek vznik ohybového napětí. Tvar těles byl navržen s cílem stanovit vliv kombinovaného namáhání (cyklický tah + cyklický ohyb) na iniciaci a počáteční šíření únavových trhlin pomocí jednoosého zatěžovacího stroje.

4.3 Zatěžování

Všechna zkušební tělesa byla zatěžována sinusovým cyklem v režimu řízené síly s parametrem asymetrie cyklu $R = 0,04$, s konstantní amplitudou napětí. Maximální aplikované napětí σ_{max} bylo voleno v intervalu hodnot 75 - 450 MPa.

U zkušebních těles typu 1 a 3 bylo zatěžování ukončeno při dosažení délky povrchové trhliny cca 10 mm nebo při cca 10^6 cyklech. U těles typu 2 bylo zatěžování ukončeno při iniciaci trhliny v povrchové vrstvě.

4.4 Zkušební zařízení

Únavové zkoušky těles typu 1 a 3 byly provedeny v laboratořích ÚFM AV ČR Brno. Zatěžování probíhalo při pokojové teplotě na servohydraulickém zkušebním stroji MTS 880. Zkušební tělesa byla upnuta do hydraulických čelistí. Na tomto stroji bylo provedeno i předcyklování pro tělesa typu 2.

Únavové zkoušky těles typu 2 byly provedeny ve Francii v rámci spolupráce s Laboratoire de Mechanique, Ecole Centrale de Lille. Zkoušky byly provedeny při normální teplotě na speciálním zkušebním stroji, který umožňuje cyklické zatěžování zkušebních těles v pracovní komoře rastrovacího elektronového mikroskopu.

Pro pozorování iniciace a pro měření délky trhliny na povrchu zkušebních těles typu 1 a 3 v závislosti na počtu cyklů byl použit světelný zrcadlový mikroskop QUESTAR QM-100 a digitální kamera. Během zatěžování byla sledována oblast v okolí kořene vrubu. Pozorování bylo soustředěno na 4 místa na tělese (oba povrchy a oba kořeny vrubu). Po ukončení cyklování byly u těles postupně odstraňovány jednotlivé vrstvy za účelem stanovení míry vnitřního poškození laminátu (tj. byl

stanoven počet, délka a místo iniciace trhlin a tvar a velikost delaminace na rozhraní kovu a prepregu). Vrstvy prepregu byly mechanicky odbroušeny. Vrstvy Al slitiny byly nejprve pomocí směsi kyselin naleptány pro zviditelnění trhlin a poté odleptány.

V rámci spolupráce s TU Delft v Holandsku bylo provedeno několik testů na zařízení C-Scan, které umožňuje provádět nedestruktivní ultrazvukové zkoušky pro hodnocení rozsahu delaminace.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

5.1 Iniciace a šíření únavových trhlin

5.1.1 Mechanismus iniciace

Při studiu mechanismu ranných stádií únavové degradace byl pozorován vrub na boční straně zkušebních těles typu 2. Ze studia vyplynulo, že nejprve probíhá iniciace trhlin ve vnitřních kovových vrstvách laminátu, teprve později (po relativně nezávislém porušení většiny vnitřních kovových vrstev četnými trhlinami) dochází k iniciaci trhliny v povrchové kovové vrstvě. Iniciace vnitřních trhlin byla stanovena jako okamžik, kdy bylo možné poprvé detekovat mikrotrhlinu na okraji vnitřní kovové vrstvy, tj. při délce trhliny cca 0,05 mm. Iniciace povrchové trhliny byla při experimentech označena jako okamžik, kdy mikrotrhlina prorostla z vnitřních vrstev na povrch laminátu a dosáhla délky, při které ji bylo možné detekovat, tzn. při trhlínách délky cca 0,1 až 0,2 mm.

Únavové trhliny iniciovaly výhradně na rozhraní kov-prepreg a to i v povrchových vrstvách laminátu. K iniciaci na rozhraní přispívá i rozložení zbytkového pnutí v kovových vrstvách.

Trhliny v kovových vrstvách jsou oddělené neporušenými vláknovými vrstvami, vzájemně se neovlivňují a jejich iniciace je relativně nezávislá. Vlákna prepregových vrstev, uložená ve směru působícího napětí omezují pohyb trhlin v kovových vrstvách. Propojování únavových mikrotrhlin mezi kovovými vrstvami je po určitou dobu omezeno vloženými vrstvami prepregu. Po určité době se vedoucí trhliny v různých vnitřních kovových vrstvách propojí pomocí mikrodelaminací na rozhraní kov-prepreg. Poté trhlina dosáhne povrchu laminátu.

Uvedený mechanismus iniciace únavových trhlin v laminátu je odlišný od mechanismu typického pro monolitický homogenní materiál, kde trhlina iniciuje obvykle na volném povrchu tělesa.

5.1.2 Místo iniciace a směr šíření trhlin

Při zatěžování těles typu 1 se ukázalo, že u vláknokovových laminátů nastává iniciace přednostně mimo kořen vrubu a nejčastější iniciační místo únavových trhlin tedy není v oblasti minimálního příčného průřezu tělesa, jak je tomu u homogeních izotropních materiálů.

Poloha trhlin byla měřena jako úhel Θ mezi místem iniciace a kořenem vrubu a dále byl sledován směr růstu povrchových trhlin. Ukázalo se, že krátce po iniciaci rostly trhliny radiálně a v určité vzdálenosti od okraje vrubu se začaly stáčet kolmo na osu zatěžování. U těles s mělkými stranovými vruby rostly trhliny radiálně až do okamžiku ukončení testu. Tyto tendence pro povrchové trhliny se později potvrdily i pro trhliny ve vnitřních vrstvách laminátu.

Ze sledování četnosti trhlin v závislosti na poloze iniciačního místa (tj. na úhlu Θ) byl vyhodnocen úhel s největší pravděpodobností výskytu trhlin Θ_p v závislosti na maximálním aplikovaném napětí σ_{max} a na teoretickém součiniteli koncentrace napětí vrubu K_t . Největší odchylka polohy trhlin ($\Theta_p = 20^\circ$) byla zjištěna pro tělesa s oválným centrálním vrubem zatěžovaná největším aplikovaným napětím. U těles se dvěma mělkými stranovými vruby nebyla pozorována výrazná závislost na σ_{max} , avšak i v tomto případě byla patrná systematická odchylka polohy trhlin ($\Theta_p = 5^\circ$).

Odchylku místa iniciace ovlivňuje vláknitá struktura (s neporušenými vlákny v místě nejmenšího průřezu tělesa a s přerušenými vlákny, které začínají od určité vzdálenosti od kořene vrubu) a vysoké hodnoty smykových napětí na rozhraní vláknematrixe v oblasti přechodu kontinuálních a přerušených vláken.

5.1.3 Počet cyklů do iniciace

U těles typu 1 byl pomocí mikroskopu sledován počet cyklů do iniciace N_{in} únavových trhlin v povrchové kovové vrstvě laminátu. Iniciace povrchové trhliny byla stanovena jako okamžik, kdy byla detekována trhlina délky cca 0,2 mm. Ze závislosti počtu cyklů N_{in} na maximálním napětí cyklu σ_{max} pro jednotlivé vruby (tj. různé hodnoty K_t) je patrné, že délka stadia iniciace závisí výrazně jak na aplikovaném napětí, tak na vrubu. Pro nízké hodnoty σ_{max} byla pozorována dřívější iniciace trhlin pro materiál větší tloušťky (tj. s vrstvením 12/11).

MKP výpočtem (se zahrnutím elasto-plastického chování kovových vrstev a zbytkových pnutí v kovu a prepregu) byla určena amplituda lokální plastické deformace v kořeni vrubu $\varepsilon_{a,pl,l}$. Všechny body závislosti $\varepsilon_{a,pl,l}$ na N_{in} pro různé

hodnoty K_t leží na jedné křivce, tzn. že amplitudu lokální plastické deformace v kořeni vrubu lze považovat za parametr determinující počet cyklů do iniciace v tělesech z materiálu GLARE. Rozsah oblasti ovlivněné lokální plastickou deformací je větší pro zkušební tělesa s ostřejším vrubem a pro vyšší aplikované napětí.

Lokální plastická deformace v kořeni vrubu je vyvolaná působením maximálního lokálního napětí. Lokální napětí v kořeni vrubu σ_{peak} je dáno vnějším aplikovaným zatížením (σ_{max}), které je ovlivněno přítomností vrubu (tj. hodnotou $K_{t,Al}$) a vnitřním pnutím v kovových vrstvách laminátu ($\sigma_{r,Al}$) a lze ho vyjádřit vztahem:

$$\sigma_{peak} = \sigma_{max} K_{t,Al} + \sigma_{r,Al} \quad (4.1)$$

Vyneseme-li počet cyklů do iniciace N_{in} v závislosti na vypočteném lokálním napětí σ_{peak} v logaritmických souřadnicích, dostaneme úzký rozptyl bodů, který může aproximovat mocninnou funkcí:

$$\sigma_{peak} = 5285 \cdot N_{in}^{-0,214} \quad (4.2)$$

Závislost mezi N_{in} , $K_{t,Al}$, $\sigma_{r,Al}$ a σ_{max} vyjádřená rovnicemi (4.1) a (4.2) objasňuje experimentálně zjištěnou kratší dobu do iniciace trhlin pro tlustší lamináty. V laminátech s vyšším počtem vrstev vzniká při vytvrzování vyšší tahové zbytkové pnutí v kovových vrstvách $\sigma_{r,Al}$, tzn. dostáváme vyšší lokální napětí v kořeni vrubu σ_{peak} , což má za následek (pro stejnou hodnotu σ_{max} a K_t) snížení počtu cyklů do iniciace N_{in} . Tato tendence je patrnější pro nižší hodnoty aplikovaného napětí σ_{max} .

Na počet cyklů do iniciace má vliv také materiál. Ze závislosti N_{in} na σ_{max} pro geometricky stejná tělesa z různých materiálů je patrné, že tělesa z laminátu mají kratší dobu do iniciace oproti tělesům z Al slitiny. U těles z materiálu GLARE 3 byl experimentálně zjištěn nižší počet cyklů do iniciace než u GLARE 2. Rozdíly v počtu cyklů do iniciace mezi jednotlivými materiály jsou způsobeny vlivem tahových zbytkových pnutí od vytvrzování a různou účinností přemostování.

5.1.4 Množství a délka únavových trhlin

V průběhu zatěžování byla v kovových vrstvách zaregistrována iniciace většího počtu trhlin. Při sledování růstu trhlin v povrchových vrstvách se ukázalo, že počet trhlin byl větší při vyšší amplitudě zatěžování. Opačný vliv na množství trhlin měla koncentrace napětí ve vrubu, neboť v případě větších koncentrací (tj. pro ostřejší

vrub) iniciovalo menší množství trhlin. Povrchová trhlina s maximální délkou v daném okamžiku zatěžování byla brána jako reprezentativní.

Po ukončení cyklování byly u těles postupně odstraňovány vrstvy a bylo zjištěno množství, délka, místo iniciace a směr růstu trhlin v kovových vrstvách. Ve všech případech rostl počet trhlin směrem do středu laminátu, zatímco jejich délka byla ve vnitřních vrstvách menší než ve vrstvách vnějších. Rozdíl mezi délkami a počtem trhlin na povrchu a uvnitř byl zjištěn pro tělesa se všemi typy vrubů.

V tomto typu materiálu je „makrotrhlina“ přes tloušťku laminátu tvořena individuálními trhlínami v jednotlivých vrstvách, které iniciují nezávisle na existujících trhlínách v jiných vrstvách a jsou odděleny neporušenými prepregy. Nezávislou iniciaci potvrzuje experimentálně zjištěný fakt, že poloha trhlin v různých vrstvách se vzájemně lišila.

Čelo makrotrhliny v laminátu je nespojité, neleží v jedné rovině a maximální délky dosahuje na povrchu. Degradace laminátu GLARE měřená délkou povrchové trhliny je pak podstatně nižší než poškození homogenního materiálu.

Zvýšenou iniciaci trhlin menších délek ve vnitřních vrstvách si lze vysvětlit horšími podmínkami pro růst trhlin. Na trhliny v povrchové vrstvě působí neporušený prepreg pouze z jedné strany a přitom rozsah delaminace na rozhraní vnější kovové vrstvy a první prepregové vrstvy je větší. Výhodnější podmínky povrchových trhlin pro růst (menší vliv přemostění) mají za následek větší rychlost růstu než ve vrstvách vnitřních..

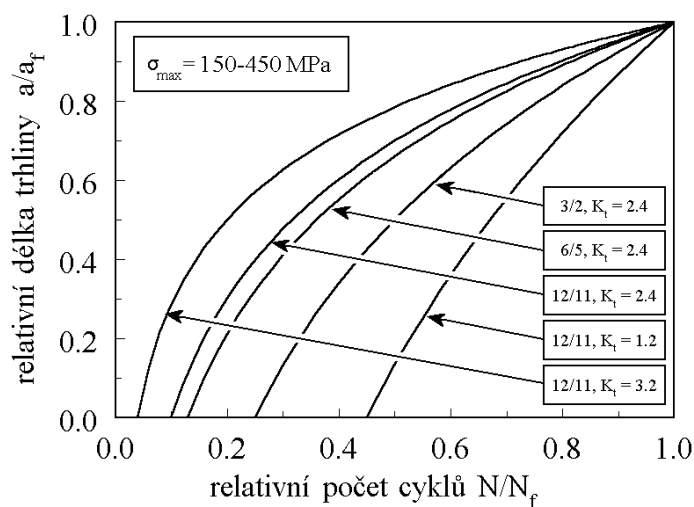
5.1.5 Šíření trhlin

Růst povrchových trhlin v materiálu GLARE byl sledován světelným mikroskopem a zaznamenáván od okamžiku jejich iniciace až do ukončení testů. Jako délka trhliny byla brána vzdálenost od kořene vrubu ke špici trhliny.

Z přírůstků délek trhlin v závislosti na počtu aplikovaných cyklů byly vyhodnoceny rychlosti růstu povrchových trhlin. Ze závislosti rychlosti růstu povrchových trhlin (v) na jejich délce (a) vyplývá, že trhliny rostly nejrychleji krátce po jejich iniciaci, přičemž s rostoucím počtem cyklů jejich rychlost klesala a od určitého okamžiku pak byla přibližně konstantní. Bylo zjištěno, že přechod mezi klesající a konstantní rychlostí růstu nastává pro délky trhlin odpovídající poloměru vrubu.

Ze závislosti délek trhlin (a) na počtu aplikovaných cyklů (N) pro všechny povrchové trhliny jednoho tělesa, byla vyhodnocena reprezentativní trhlina jako logaritmická aproximace experimentálních dat (tzn. nejdelší trhlina v daný okamžik zatěžování). Z růstových křivek byl stanoven počet cyklů do iniciace reprezentativní trhliny a také počet cyklů a délka trhliny při ukončení zatěžování (hodnoty N_f a a_f).

Vyneseme-li reprezentativní trhliny v relativních souřadnicích tj. jako závislost relativní délky trhliny a/a_f versus podíl počtu cyklů N/N_f , pak křivky růstu jsou nezávislé na úrovni zatěžování, tj. na hodnotě σ_{max} . Ze srovnání ze směrnic křivek růstu reprezentativních trhlin v relativních souřadnicích pro různá tělesa (s různými tloušťkami a různými vruby) vyplývá, že rychlost růstu je maximální při iniciaci trhlin a s rostoucím počtem cyklů klesá a rychlost růstu trhlin je různá u těles se stejným vrubem, ale s rozdílnou tloušťkou. Z výsledků je rovněž patrné, že rychlost růstu krátkých trhlin výrazně závisí na koncentraci napětí ve vrubu. Maximální rychlosti dosahovaly krátké trhliny rostoucí z oválného centrálního vrubu. Pro delší trhliny, kde není vliv koncentrace napětí od vrubu tak výrazný, byl kontrolním parametrem pro růst trhlin faktor intenzity napětí.



Obr. 4.1: Závislost relativní délky trhliny na podílu počtu cyklů, tj. křivky růstu reprezentativních trhlin, pro tělesa s různým vrstvením.

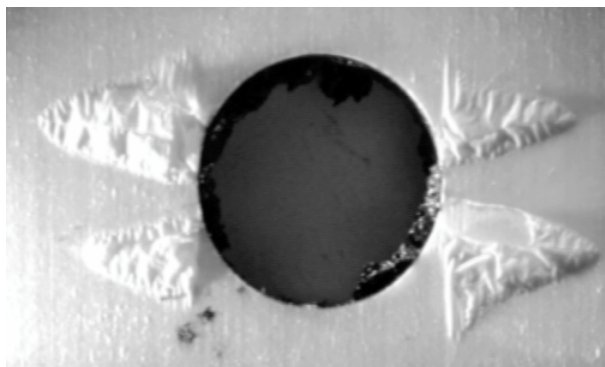
Z hlediska únavové životnosti má efekt přemostování významnější vliv ve stádiu šíření dlouhých trhlin, kdy aktivovaná vlákna přemostující trhlinu způsobují výrazný pokles rychlosti růstu a tedy prodloužení životnosti tělesa nebo součásti.

5.1.6 Delaminace

➤ *Pozorování delaminace světelným mikroskopem Questar*

Pomocí světelného mikroskopu QUESTAR byl u těles typu 1 a 3 zjišťován tvar a velikosti delaminace na rozhraní kovových a prepregových vrstev.

Delaminovaná oblast je (po odleptání Al vrstvy s trhlinou) patrná jako zpuchření povrchové vrstvičky prepregu, která je chudší na vlákna a která se poškodí působením smykových napětí na rozhraní kov-prepreg.



Obr. 4.2: Vzhled delaminované oblasti na povrchu prepregu (po odleptání kovové vrstvy) v tělese zatěžovaném napětím 450 MPa.

Na většině snímků delaminací byla patrná i stopa, kterou v povrchové vrstvičce adheziva zanechala trhlinka šířící se v přilehlé kovové vrstvě. V ostatních případech byla provedena její „rekonstrukce“ (do zaznamenaného tvaru delaminace byla zanesena délka a tvar trhliny z přiléhající kovové vrstvy). Ve všech případech byla delaminace soustředěna kolem iniciovaných trhlín.

Z výsledků pro tělesa s různými vruby byly patrné rozdíly mezi rozsahem delaminace na rozhraních uvnitř a vně laminátu. Bylo zjištěno, že ve vnitřních rozhraních vícevrstvých laminátů dokonce často k delaminaci vůbec nedošlo. U těles se stejným vrubem, zatěžovaných různým aplikovaným napětím je možné pozorovat pokles rozsahu delaminace s klesající hodnotou aplikovaných napětí.

Ze srovnání tvaru delaminace v materiálu typu GLARE pro trhliny kratší (cca 5 mm) a delší (cca 10 mm) je patrné, že zjištěné tvary delaminací odpovídají lépe elipsovitému tvaru (popsanému v literatuře) až pro delší trhliny. U materiálu GLARE 2 a kratších trhlín měla většina delaminací tvar spíše nepravidelný. Další odchylky od elipsovitého tvaru delaminace byly způsobeny výskytem dvou a více trhlín v jednom kořeni vrubu nebo překříženým uspořádáním vláken (GLARE 3).

Kvalitativně byly sledovány různé vlivy na tvar a rozsah delaminace. Pro kvantitativní charakterizování rozsahu delaminace lze použít buď velikost poloos elipsy (pro delaminaci eliptického tvaru), nebo velikost plochy delaminace, což je pro delaminace nepravidelných tvarů jednodušší a přesnější. Z porovnání exponenciálních proložení závislostí plochy delaminace na délce trhliny, která ji vyvolala, je pro tělesa z materiálu GLARE 2 zatěžovaná na různých napěťových hladinách vyplývá, že pro vyšší aplikované napětí dochází ke vzniku vyšších smykových napětí (resp. deformací) na rozhraní kovové a prepregové vrstvy a jejich následkem pak vzniká delaminace o větším rozsahu. Závislost rozsahu delaminace na hodnotě součinitele koncentrace napětí se neprokázala.

➤ *Pozorování na zařízení C-Scan*

Pozorování na ultrazvukovém zařízení C-Scan potvrdilo, že rozsah delaminace pro tělesa se stejným vrubem roste s rostoucím aplikovaným napětím. Porovnáme-li výsledky studia delaminace zjištěné za pomoci destruktivní metody a světelné mikroskopie s výsledky pozorování, které byly provedeny za pomoci zařízení C-Scan, zjistíme, že ultrazvuková metoda je vhodná pro kvantitativní vyhodnocování velikosti delaminace pouze za určitých podmínek. Nicméně pro kvalitativní vyhodnocení lze tuto metodu dobře použít. Nespornou výhodou je nedestruktivní povaha zkoušky pro odhalení delaminace. Nevýhodou je obtížné stanovení toho, na kterém rozhraní k delaminaci došlo.

5.1.7 Únavová životnost

Z křivek životnosti, tj. ze závislostí maximálního zatížení σ_{max} na počtu cyklů N_f je patrné, že životnost těles s dvěma mělkými stranovými vruby ($K_t = 1,2$) je větší oproti životnosti těles s centrálním kruhovým otvorem ($K_t = 2,4$) nebo centrálním oválným vrubem ($K_t = 3,2$). Dále je zřejmé, že pro oválný vrub a kruhový otvor, se křivky životnosti už výrazně neliší. Ze srovnání křivek životnosti pro různou tloušťku těles můžeme (zejména pro vysoká zatížení) vyzorovat nepatrně kratší životnost pro tenčí tělesa.

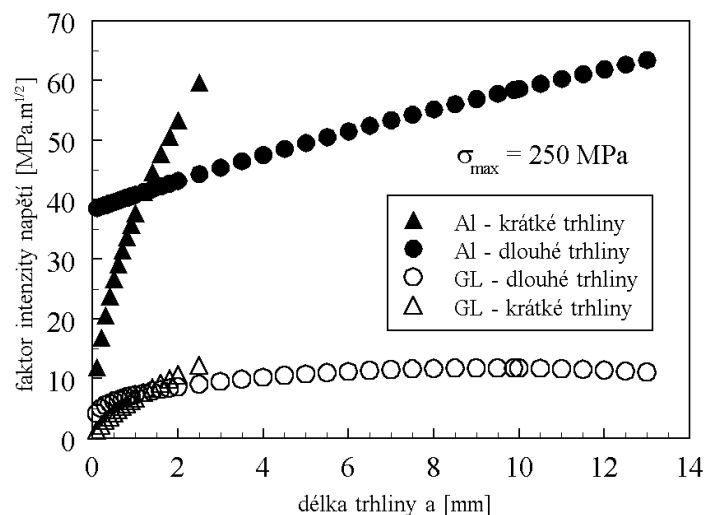
5.2 Faktor intenzity napětí

Základním předpokladem pro stanovení rychlosti růstu únavových trhlin v kompozitu je stanovení K -faktoru buď experimentálně nebo výpočtem. Výpočet faktoru intenzity napětí na špici trhliny v kovových vrstvách laminátu je komplexní problém, který se dá řešit analyticky nebo numericky. Přesný výpočet metodou

konečných prvků by vyžadoval použití třídimenzionální úlohy, prvky pro modelování laminátů a jemnou síť nejen na čele trhliny, ale i na hraně delaminace. Proto se jeví jako výhodné analytické stanovení faktoru intenzity napětí. Je zřejmé že v tomto analytickém řešení jsou z důvodu řešitelnosti provedeny určité omezující předpoklady a řešení tedy nemůže být zcela přesné.

5.2.1 Příklad výpočtu

Výpočet faktoru intenzity napětí byl proveden pro zkušební těleso z materiálu GLARE 2, které obsahuje trhlínu rostoucí z centrálního kruhového otvoru průměru 15 mm. Pro srovnání byl proveden výpočet K -faktoru také pro těleso identických rozměrů, vyrobené z Al slitiny. Výpočet hodnot K -faktoru pro oba materiály (monolit i laminát) byl rozdělen na výpočet pro krátké a dlouhé trhliny (tzn. pro délky trhlín $a = 0 - 13$ mm). Stejný výpočet byl proveden pro čtyři napěťové hladiny a to pro zkušební tělesa se všemi typy vrubů.



Obr. 4.3: Faktor intenzity napětí pro tělesa ze dvou typů materiálu, s centrálním vrubem ($K_t = 2,4$), zatěžovaná napětím 250 MPa.

Z výsledků výpočtů vyplývá, že tranzitní délka trhlín, tj. velikost trhliny která vymezuje krátké a dlouhé trhliny, byla pro tělesa s centrálním kruhovým otvorem dána poměrem $a/r = 0,16$; pro tělesa s oválným centrálním vrubem poměrem $a/r = 0,2$ a u těles s dvěma mělkými stranovými vruby poměrem $a/r = 0,13$.

Závislost K -faktoru na délce trhliny rostoucí z vrubu pro homogenní izotropní materiály nezávisí na materiálu. U těles z laminátu GLARE však, vlivem struktury materiálu, dostáváme jinou závislost K versus a . Ze srovnání těchto závislostí pro amizotropní a izotropní materiál je patrné, že faktor intenzity napětí v tělese z Al

slitiny je výrazně vyšší než v tělese z laminátu GLARE 2. Dále je patrné, že tento rozdíl roste s rostoucí délkou trhliny. Tento stav bylo možné pozorovat ve všech vypočtených závislostech. U laminátového tělesa se s rostoucí délkou trhliny začíná výrazněji projevovat zavírací efekt neporušených vláken, která trhlínu přemostují. Zavírací efekt má za následek poměrně nízkou hodnotu faktoru intenzity napětí, která je od určitého okamžiku (tj. pro trhliny od velikosti $0,5 \cdot \rho$) přibližně konstantní.

Podle uvedených výsledků lze brzy po iniciaci očekávat konstantní neakcelerující růst únavové trhliny v laminátu GLARE 2, na rozdíl od zrychleného růstu trhliny v Al slitině.

5.2.2 Stanovení vlivu vláken

Výsledkem přemostování u vlákno-kovových laminátů je nižší hodnota faktoru intenzity napětí a tím i nižší rychlost šíření trhlin ve srovnání s chováním tělesa z homogenního materiálu se stejnou délkou únavové trhliny.

Aktivním působením zpevňujících vláken dochází k rozdílu mezi hodnotou faktoru intenzity napětí v tělese z monolitického materiálu (K) a v tělese z laminátu (K_{lam}). Označíme-li tento rozdíl (způsobený přemostovacím napětím σ_{br}) jako K_{br} a vyneseme-li ho v závislosti na délce trhliny a rostoucí z vrubu, pak při zatěžování stejných těles na různých napěťových hladinách (σ_{max}) dostáváme různé křivky.

Ze srovnání hodnot K_{br} (tj. ze závislostí pro zkušební tělesa s vrubem jednoho typu) je patrné, že hodnota K_{br} roste s rostoucím σ_{max} , tj. roste brzdící účinek zpevňujících vláken.

Vyjádríme-li relativní redukci K -faktoru způsobenou přítomností zpevňujících vláken jako poměr K_{br}/K (tzn. jako hodnotu K -faktoru od přemostění vztaženou na faktor intenzity napětí v homogenním tělese bez vláken), pak závislosti K_{br}/K versus délka trhliny a pro všechny úrovně zatěžování, lze proložit jedinou křivkou.

Závislost K_{br}/K vs a vyjadřuje relativní brzdící účinek zpevňujících vláken na rychlost růstu únavových trhlin. V závislosti relativního brzdícího účinku je eliminován vliv vrubu a vliv amplitudy zatěžování. Tato závislost tedy může sloužit k odhadu skutečného součinitele intenzity napětí v reálné součásti vyrobené z laminátu GLARE 2 na základě výpočtu součinitele intenzity napětí pro homogenní těleso. Pro zkušební tělesa s různými vruby zatěžovaná na různých napěťových hladinách je situace obdobná.

Z porovnání křivek závislosti K_{br}/K na a , pro studované tři typy vrubů lze usoudit na shodnou tendenci u účinku zpevňujících vláken. Z výsledků je patrné, že krátce po iniciaci tj. pro malé délky trhlin (cca do 0,2 mm) dochází k poklesu této křivky, pro trhliny od 0,2 do 10 mm je hodnota poměru K_{br}/K přibližně konstantní a pro trhliny přesahující délku 10 mm mírně narůstá. To si lze vysvětlit tak, že krátce po vzniku trhlin (tj. po iniciaci) je působení vláken účinné na téměř 90%. Přemost'ující vlákna tak brání růstu trhlin, což má za následek zvýšenou iniciaci. S rostoucí délkou trhliny vliv přemostění nejprve klesá na přibližně 78% hodnoty K a poté se hodnota K_{br} ustálí popř. začne opět narůstat tzn. vliv vláken udržuje konstantní popř. dokonce mírně klesající rychlost růstu únavových trhlin.

Efekt přemost'ování je výraznější pro větší délky trhlin a to zejména z důvodu aktivace vyššího počtu vláken. V závislosti na struktuře laminátu může vliv přemostění redukovat rychlost růstu trhlin tak, že trhlina nebude zrychlovat (což je typické pro kovové materiály), ale bude se šířit konstantní rychlostí (GLARE 3), popř. může dojít i k poklesu rychlosti růstu (GLARE 2) s rostoucí délkou trhliny. Konstantní nebo klesající rychlost růstu je dána tím, že zrychlení trhliny vlivem nárůstu její délky je kompenzováno zpomalením vlivem přemost'ujících vláken. (u GLARE 2 účinněji - díky nižšímu podílu vhodně orientovaných vláken)

5.3 Kombinované namáhání

5.3.1 Inicie trhlin

Iniace prvních únavových trhlin byla pozorována ve vnější povrchové kovové vrstvě, která podléhala maximálnímu ohybovému napětí. Trhliny ve vnitřních vrstvách se vyskytly mnohem později a nejpozději iniciovaly trhliny na opačném povrchu tělesa tj. ve vrstvě zatížené minimálním ohybovým momentem.

Ze závislosti maximálního aplikovaného tahového napětí σ_{max} na počtu cyklů do iniciace povrchové trhliny N_{in} vyplývá různý vliv ohybu na iniciaci trhlin, který je způsobený různým vyosením centrální části zkušebních těles.

Rozdílná poloha křivek σ_{max} vs N_{in} na potvrzuje, že přídavný ohyb zkracuje dobu do iniciace v laminátu GLARE 3 (ve vrstvě s vyšším ohybovým napětím dochází k dřívější iniciaci). Tento efekt je zřetelnější pro nižší hodnotu cyklického napětí kdy poměr ohybových a tahových napětí, označený jako k , je vyšší.

Pro materiál GLARE platí (stejně jako pro homogenní materiály), že lokální plastická deformace $\varepsilon_{pl,l}$ v kořeni vrubu je parametrem, který určuje počet cyklů do

iniciace trhlin N_{in} v kovové vrstvě laminátu zatíženého cyklickým kombinovaným tahovým a ohybovým namáháním. Ze závislosti $\varepsilon_{pl,l}$ na N_{in} pro tělesa s různou hodnotou vyosení získáme rovnici pro predikci doby do iniciace trhlin:

$$\varepsilon_{pl,l} = 1745 \cdot N_{in}^{-1,313} \quad (4.3)$$

jestliže známe lokální plastickou deformaci $\varepsilon_{pl,l}$ na hraně vrubu v dané kovové vrstvě (i vnitřní) pak můžeme vztah (4.3) použít pro predikci N_{in} také ve vnitřních (skrytých) vrstvách laminátu. Podkladem pro tuto závislost jsou výsledky výpočtů $\varepsilon_{pl,l}$, které byly provedeny ve spolupráci s ÚMT VUT v Brně s použitím MKP se zahrnutím materiálové a geometrické nelinearity.

5.3.2 Šíření trhlin

Ze závislosti délky povrchové trhliny a měřené z kořene vrubu versus aplikovaný počet cyklů N vyplývá, že experimentální data mohou být proložena lineárně, tzn. že rychlost růstu povrchových trhlin byla přibližně konstantní a to pro všechna tělesa z materiálu GLARE 3. Experimentální data byla získána z povrchové vrstvy vystavené maximálnímu ohybovému napětí.

Ze rozsahu únavového poškození uvnitř laminátu vyplynulo, že u těles zatížených stejným napětím σ_{max} , kde vlivem různého vyosení bylo vyvolané různé ohybové napětí σ_{bend} byly zjištěny různé délky trhlin v jednotlivých vrstvách. Pro hladké těleso (tj. těleso bez vyosení) je délka trhlin uvnitř výrazně menší než na povrchu. Pro tělesa s vyosením je značný rozdíl mezi trhlami na opačných površích tělesa, přičemž vyšší podíl ohybového napětí způsobuje větší rozdíl délek trhlin. V některých případech (pro vyšší hodnoty vyosení) nedošlo až do ukončení zatěžování k iniciaci a šíření trhlin ve všech vrstvách laminátu. Stejně jako v materiálu GLARE 2 tedy platí, že vrstvy vláken jsou efektivními bariérami před šířením trhlin z jedné kovové vrstvy do sousední.

Ze závislosti rychlosti šíření povrchové trhliny v na napětí v povrchové kovové vrstvě σ_{layer} spočtené pomocí MKP (ve spolupráci s VUT) dostáváme vztah pro predikci rychlosti růstu nebo pro výpočet zbytkové životnosti ostatních vrstev jestliže známe lokální napětí v dané vrstvě:

$$v = 7,17 \cdot 10^{-10} \exp \frac{\sigma_{layer}}{10,8} \quad (4.4)$$

Protože není běžné vyjadřovat rychlost růstu únavových trhlin přímo přes napětí σ_{layer} působící v jednotlivých kovových vrstvách, je třeba toto řešení brát jako další způsob pro stanovení rychlosti růstu. Rychlost růstu únavových trhlin je dána faktorem intenzity napětí, ovšem výpočet K -faktoru laminátu může být poměrně složitý a zdlouhavý. Vlivem ohybu při kombinovaném zatěžování se situace dále komplikuje vznikem rozdílných napětí v jednotlivých vrstvách.

6 ZÁVĚRY

Studium únavového chování laminátů GLARE vedlo k těmto závěrům:

- mechanismus iniciace únavových trhlin v materiálech typu GLARE a monolitech se liší (trhliny iniciují nejprve ve vnitřních vrstvách laminátu)
- byly stanoveny vztahy pro predikci počtu cyklů do iniciace a pro predikci životnosti pro vrubovaná tělesa z laminátu
- vlivem ohybu při kombinovaném namáhání je doba do iniciace povrchových trhlin zkrácena a rozšíření trhlin do ostatních kovových vrstev nastává později
- počet trhlin je větší a délka trhlin kratší ve vnitřních vrstvách než na povrchu
- trhliny rostou v určitém intervalu úhlů od kořene vrubu
- prepreg je efektivní bariéra proti růstu trhlin z jedné vrstvy do druhé, trhliny v jednotlivých vrstvách rostou odděleně a nezávisle na sobě
- tvar a rozsah delaminace závisí na typu materiálu, velikosti trhliny, která delaminaci vyvolala a na poloze rozhraní blíže nebo dále od povrchu
- byly porovnány dvě metody pro určení rozsahu delaminace v materiálu GLARE
- rychlost růstu únavových trhlin je maximální při iniciaci a s rostoucím počtem cyklů klesá (GLARE 2) nebo je po celou dobu přibližně konstantní (GLARE 3)
- rychlost růstu trhlin ($a > r$) závisí na amplitudě zatěžování
- pro dlouhé trhliny je vliv vláken na faktor intenzity napětí velmi výrazný; hodnota K -faktoru je vlivem vláken přibližně konstantní
- faktor intenzity napětí v tělesech z laminátů je výrazně nižší než v geometricky stejných tělesech z homogenního materiálu a tento rozdíl roste v závislosti na délce trhliny
- relativní redukce faktoru intenzity napětí nezávisí na úrovni aplikovaného vnějšího zatížení
- závislosti relativní redukce K -faktoru na délce trhliny pro tělesa s různými vruby zatěžovaná různým napětím je možné proložit jedinou křivkou

- s rostoucí délkou trhliny vliv přemostujících vláken nejprve klesá, pak je konstantní nebo dokonce mírně stoupající, tzn. přemostování má za následek nejprve vysokou rychlost růstu a poté nastává konstantní popř. (pro trhliny přesahující 10 mm) mírně klesající rychlost růstu únavových trhlin
- byla stanovena závislost počtu cyklů do iniciace na lokální plastické deformaci v kovové vrstvě
- byla stanovena rychlost růstu trhlin v kovových vrstvách v závislosti na napětí ve vrstvě (při cyklickém prostém a kombinovaném namáhání)

7 LITERATURA

- 1 Roebroeks G.: Towards GLARE - The Development of a Fatigue Insensitive and Damage Tolerant Aircraft Material, TU Delft, 1991
- 2 Sinke J.; van Praag P.: Manufacturing of fibre-metal laminates, TU Delft, 1994
- 3 Vašek A.: Optimalizace mechanických vlastností vlákno-kovových laminátů, In: CONMET 94, Brno, pp. 112-118, 1994
- 4 Voegesang L.B.; Schijve J.; Fredell R.: Fiber-Metal Laminates: Damage Tolerant Aerospace Materials, *Manufacturing with Advanced Materials*, Vol. 2, pp. 253-271, 1995
- 5 Gunnink J.W.; Voegesang L.B.: Fibre-Metal Laminates and the Very Large Civil Transport, TD-M-94006, Structural Laminates B.V. Delft, 1994
- 6 Vlot A.: Impact Tests on Fibre Metal Laminates under a Tensile Load, LR-714, TU Delft, March 1993
- 7 Mensink J.L.M.: Thermal Properties and Possibilities for Space Applications of Fiber Metal Laminates, TU Delft, April 1994
- 8 Papakyriacou M.; Stanzl-Tschegg S.E.; Mayer H.R.; Schijve J.: Fatigue Crack Growth in GLARE, Role of Glass Fibers, pp. 1193-1199, In: ECF 10, Berlin, 1994
- 9 Schijve J.: Fatigue of Aircraft Materials and Structures, *Fatigue*, Vol. 16, No. 1, pp. 21-32, 1994
- 10 Papakyriacou M.; Schijve J.; Stanzl-Tschegg S.E.: Estimation of the Fiber Bridging Capability of Two Fiber-Metal Laminates at High Cycle Fatigue Loading, In: Fatigue '96, pp.1523-1528, 1996
- 11 Stanzl S.E., Papakyriacou M., Tschegg E.K.: Fibre-Bridging in Aramid Reinforced Aluminum Alloy Composites, In: International Conference on Aluminum Alloys, Trondheim, June 1992
- 12 Vašek A.; Voegesang L. B.: Fatigue life of multi-layered fibre-metal laminates,

In: SAMPE, Basel 1996

- 13 Vašek A.; Dymáček P.; Vogelesang L. B.: Fatigue strength of L610-P wing-fuselage attachment lug made of GLARE 2 fibre-metal laminate, In: Fatigue Design 1998, Espoo, 1998
- 14 Vašek A.; Polák J.; Kozák V.: Fatigue crack initiation in fibre-metal laminate GLARE 2, *Mat. Sci. Engng*, A234-236, pp. 621-624, 1997
- 15 Vašek A.; Polák J.; Vogelesang L. B.: Fatigue crack initiation and early growth in the multi-layered fibre-metal laminate GLARE2, In: ECF11, pp. 1685-1690, Poitiers 1996
- 16 Coesel J.F.W: Drilling of Fibre-Metal Laminates, TU Delft, April 1994
- 17 Tomter R.: Constant Amplitude Fatigue of ARALL 2 and GLARE 2, TU Delft, March 1991
- 18 Schijve J., Wiltink F.J., van Bodegom V.J.W.: Flight-Simulation Fatigue Tests on Notched Specimens of Fiber-Metal Laminates, LRV-10, TU Delft, 1994
- 19 Peterson R.E.: Stress Concentration Factors: Charts and Relations Useful in Making Strength Calculations for Machine Parts and Structural Elements, ISBN: 0-471-68329-9, 1974
- 20 Vermeeren C.A.J.R.: The Application of Carbon Fibres in ARALL Laminates, LR-658, October 1991
- 21 Vermeeren C.A.J.R.: The Blunt Notch Behaviour of Metal Laminates: ARALL and GLARE., LR – 617, TU Delft, January 1990
- 22 Vašek A.; Letaut S.; Vittecoq E.: In situ observation of fatigue crack initiation in notched fibre-metal laminates, In: ICFC Paris, pp.205-212, 1997
- 23 Papakyriacou M.; Stanzl-Tschegg S.E.; Schijve J.: Fatigue Behaviour of Notched Components of Fiber-Metal Laminates (GLARE), In: Fatigue Design, pp. 309-320, Helsinki, 1995
- 24 Prášilová A: Iniciační a počáteční růst únavových trhlin, Diplomová práce, VUT Brno, FS, 1996
- 25 Marissen R.: Fatigue Crack Growth in ARALL - A Hybrid Aluminium-Aramid Composite Material, LR-574, TU Delft, June 1988
- 26 Vašek A., Prášilová A.: Součinitel intenzity napětí laminátového kompozitu GLARE, *Engng. Mech.*, Vol. 7, No. 3, pp. 209-219, 2000
- 27 Ellyin F.: Fatigue damage, crack growth and life prediction, ISBN 0-412-59600-8, Published by Chapman and Hall, London 1997
- 28 Schijve J.: The Stress Intensity Factor of Small Cracks at Notches, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* , Vol.5, pp. 77-90, 1982

- 29 Lukáš P.: Stress intensity factor for small notch-emanated cracks, *Engng.Fract.Mech.* 26, p. 471, 1987
- 30 Nam K.W.; Ando K.; Ogura N.; Matui K.: Fatigue Life and Penetration Behaviour of a Surface-Cracked Plate under Combined Tension and Bending, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.17, No.8, pp.873-882, 1994
- 31 Fawaz S. A.: Fatigue Crack Growth in Riveted Joints, Delft University Press 1997, ISBN: 90-4-7-1520-3

PUBLIKACE

- PRÁŠILOVÁ, A.: Inicie a počáteční růst únavových trhlin ve vlákno-kovových laminátových kompozitech. Diplomová práce, VUT Brno, 1996.
- PRÁŠILOVÁ, A., VAŠEK, A., KOZÁK, V.: Inicie únavových trhlin ve vrubovaném laminátovém kompozitu GLARE, Degradácia vlastností konštrukčných materiálov únavou, Zuberec - Roháče, 1997.
- PRÁŠILOVÁ, A., VAŠEK, A.: Vliv zpevňujících vláken na rychlost počátečního šíření únavových trhlin v laminátovém kompozitu GLARE, Metody oceny struktury oraz własności materialow i wyrobow, Svratka, 1997.
- PRÁŠILOVÁ, A., VAŠEK, A.: Retarding effect of reinforcing fibres on early crack growth in fatigued notched laminate GLARE 2, *Engineering Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 219-223, 1998.
- PRÁŠILOVÁ, A., VAŠEK, A., LETAUT, S.: SEM observation of fatigue crack initiation in fibre-metal laminates, *Junioreuromat*, Lausanne, 1998.
- PRÁŠILOVÁ, A., VAŠEK, A.: Delaminační chování vlákno-kovových kompozitů typu GLARE, *Materiálové vědy na prahu 3. milénia*, FSI VUT Brno, 1999.
- VAŠEK, A., PRÁŠILOVÁ, A.: Součinitel intenzity napětí laminátového kompozitu GLARE, *Engineering Mechanics*, Vol. 7, No. 3, pp. 209-217, 2000.
- PRÁŠILOVÁ, A.: Delamination in GLARE, konference: *Physical Aspects of Fracture*, Cargese, Corsica, 2000.
- PRÁŠILOVÁ, A.: Porovnání iniciace a šíření únavových trhlin v materiálu GLARE pro cyklické tahové a kombinované zatěžování, *Letná škola únavy materiálů*, Zuberec - Roháče, 2000.
- PRÁŠILOVÁ A.: Delamination in GLARE fiber-metal laminate, *Junioreuromat* 2000, Lausanne, 2000.

CHLUPOVÁ A., HEGER J., VAŠEK A.: Fatigue Crack Initiation and Early Growth in GLARE 3 Fiber-Metal Laminate Subjected to Mixed Tensile and Bending Loading, Advanced Engineering Design, Glasgow, 2001.

RESUME

Fatigue behaviour of laminate composites

The fatigue crack initiation and propagation was studied in a hybrid fiber-metal laminate GLARE. The aim of the thesis was to enlarge knowledge of early stages of the fatigue process in notched laminate specimens.

In the second chapter of work the overview of current knowledge on laminate GLARE is given.

In the fourth chapter the used material and shape of the flat specimen with three types of notch was described. Specimens were cycled with the constant stress amplitude in the servohydraulic testing machine or in the special fatigue micro machine. Fatigue degradation was studied using light microscopy or ultrasonic equipment.

Experimental results and the discussion are a content of the fifth chapter. First the mechanism of initiation and early growth of fatigue cracks was found. The difference between the crack initiation in the laminate and isotropic material was discussed. Number of cracks, crack length and crack position in the notch root was observed and difference between inner and outer metal layer was found.

Next observation was focused on the delamination accompanying the crack growth. It was proved that shape and size of delaminated area depend on the applied loading and type of laminate. The fatigue life of laminate notched specimens was determined.

The main attention is paid to description of fiber bridging effect on the stress intensity factor at the crack tip. The modified method for assessment the stress intensity factor was applied to calculate the stress intensity factor in the metal layer of laminate.

At the end of this chapter the fatigue properties of laminate specimens under combined cyclic tension and bending loading was observed. Dependence of crack initiation and crack growth on secondary bending was shown.

Information obtained during study of cyclic loaded laminate specimens is valuable for understanding fatigue behaviour of this material and for the fiber-metal laminate application in real structures.

CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Alice Chlupová (rozená Prášilová)

Narozena: 9. února 1973 v Rýmařově

Národnost: česká

Rodinný stav: vdaná

Vzdělání:

1979-1988 Základní škola ve Vrbně pod Pradědem

1988-1991 Střední průmyslová škola strojní v Bruntále, obor: Strojírenská technologie (maturitní zkouška složena dne 23. 5. 1991)

1991-1996 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor: Materiálové inženýrství (státní zkouška složena dne 20. 6. 1996)

Téma diplomové práce:

Iniciace a počáteční růst únavových trhlin ve vláknokovových laminátových kompozitech

1996-1999 Postgraduální doktorské studium na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta strojního inženýrství, obor: Fyzikální a materiálové inženýrství, (státní doktorská zkouška 1. 7. 1999)

Téma disertační práce:

Únavová odolnost laminátových kompozitů.

Aktivity:

od r. 1994 Pomocná vědecká síla na Ústavu fyziky materiálů (ÚFM) AV ČR, Brno.

od r. 1996 Pedagogická činnost na VUT FSI Brno: cvičení pro 1. a 3. ročník inženýrského studia.

Zaměstnání:

1998 - 2000 Odborný pracovník v oddělení mechanických vlastností ÚFM AV ČR

2000 - 2001 Odborný pracovník v oddělení mechanických vlastností ÚFM AV ČR
přijatý na řešení jednoletého doplňkového postdoktorandského grantu
GA AV ČR č. C2041104

Vědecká specializace:

Mechanické vlastnosti, únavové chování materiálů, kompozitní materiály.

Experimentální zkušenosti:

Mechanické zkoušky, příprava vzorků, fraktografie.