

Návrh metodiky pro predikci poklesu tuhosti únavově zatěžovaných kompozitních konstrukcí

Autor: Ing. Michal Král

Školitelé: prof. Ing. Stanislav Holý, CSc., Ing. Bohuslav Cabrnach, Ph.D.

Úvod a motivace

Únavové poškození u kompozitních materiálů je charakteristické rozvojem několika mechanismů porušování. První poškození nastává krátce po začátku cyklického zatěžování a zasažené oblasti se rozšiřují. V zasažené oblasti může docházet k postupnému rozvoji mnoha mechanismů porušování. Důsledkem rozvoje poškození je změna tuhosti v zasažené oblasti. V celé kompozitní součásti pak dochází k výrazným redistribucím napětí a klesá namáhání v nejvíce zatížené oblasti dílu za současného přitížení méně namáhaných oblastí. Rozdílné mechanismy poškození lze očekávat např. v laminátu s jednosměrnou vyztuží a v laminátu s tkaninovou vyztuží. K iniciaci poškození v podobě tvorby mikrotrhlin v matici dochází od počátku cyklického zatížení. Trhliny v matici se formují nejvíce v vrstvách, jejichž orientace není rovnoběžná se směrem zatěžování. Při dalším zatěžování se trhliny v matici objevují i v ostatních vrstvách. S rostoucím počtem cyklů se zvyšuje hustota trhlín a dochází k jejich vzájemnému prorůstání. Tyto procesy jsou též doprovázeny značným poklesem tuhosti.

Modely pro predikci životnosti kompozitních materiálů bylo navrženo značné množství. Jednotlivé modely se od sebe liší zejména v použitím přístupu. První navržené přístupy vycházely z metodik vyvinutých pro kovové materiály. Dále byly sestaveny např. přístupy založené na sledování degradace mechanických vlastností a také na sledování základních mechanických poškození. Společným rysem všech metodik modelování je snaha o zavedení kritéria porušení a stanovení životnosti. Volba modelu predikce životnosti je dána přesnou definicí mezního stavu. Pokud je jako mezní stav určen pouze lom součástí, je možné vycházet z modelu založených na S-N křivkách a Goodmanových diagramech. Naopak, v případě, kdy je jako mezní stav určen pokles tuhosti pod určitou mez, je nutné volit modely, které umožňují pokles tuhosti předlomu.

Při studiu literatury je patrné, že velká skupina modelů predikce životnosti byla navržena a testována při jednoosém zatěžování. Avšak nelze přehlížet fakt, že kompozitní konstrukce mohou mít složitou geometrii a mohou být vystaveny zcela obecným módům zatěžování. Nejsložitější mód zatěžování, který byl v dostupných studiích aplikován, byl ohyb prizmatických zkusebních těles tvaru plochých tyčí. Fakt, že i samotný pokles tuhosti může být definován jako mezní stav, byl již diskutován. Metodika, která umožní provést odhad změny tuhosti a redistribuce namáhání, může velmi výrazně přispět k přesnosti stanovení kritických průřezů a tím i záloh bezpečnosti. Zároveň umožní popsat změny v tuhosti konstrukce a vliv na její další charakteristiky, které tuhosti ovlivňují. Metodika, u které lze předpokládat obecné uplatnění, musí splňovat zásadní kritérium, které lze formulovat následovně:

- Musí být ve všech ohledech snadno uchopitelná a aplikovatelná. Toto kritérium lze dále rozvést do následujících dílčích požadavků:
 - Vypočtová náročnost ve smyslu strojího čísla a požadované složitosti výpočtových modelů musí zůstat na přijatelné úrovni.
 - Nároky na data, potřebná pro identifikaci použitých modelů, musí být splnitelné dostupnými prostředky. Je vhodné vycházet ze známých a normalizovaných postupů, aby bylo dosaženo porozumění ze strany zadavatele, popř. orgánů majících dohled nad návrhem konstrukce.
 - Výsledky, které metodika poskytne, musí být jasné a jednoznačně interpretovatelné ve smyslu stanovení záloh bezpečnosti, pravděpodobnosti vzniku fatální poruchy a podobně.

Cíle disertační práce

Na základě poznatků získaných při literární rešerši, zvyšujících se požadavků na přesnost dimenzování a na únosnost konstrukcí vyrobených z vláknových kompozitů vyplývá následující hlavní cíl práce:

➢ **Navrhnout metodiku pro predikci poklesu tuhosti únavově zatěžovaných konstrukcí vyrobených z kompozitních materiálů.** Vedle přímého cíle práce v podobě nových poznatků pro obor mechaniky kompozitních materiálů a jejich porušování by měl být brán ohled na použitelnost navržených postupů také v technické praxi. Z toho pohledu vyplývají některá omezení popsaná níže. Splnění hlavního cíle práce je podmíněno splněním souvisejících dílčích úkolů, které jsou podrobně specifikovány v následujícím seznamu:

- **Vypracovat a verifikovat postupy pro experimentální měření změn vybraných mechanických vlastností.** Při studiu literárních zdrojů a dostupných normalizovaných postupů bylo zjištěno, že neexistují jasné definované postupy pro měření poklesu základních mechanických vlastností kompozitních materiálů. V literatuře je patrná značná improvizace. Při návrhu těchto postupů by měl být kladen důraz na přijatelné požadavky na experimentální zařízení, aby je bylo schopné splnit standardně vybavené laboratorě zabývající se materiálovými zkouškami.
- **Navrhnout model pro predikci poklesu tuhosti při únavovém zatěžování.** Součástí návrhu by měla být i metodika jeho identifikace s pomocí dat získaných postupem naznačeným v předchozím bodě. Model by měl být implementován do MKP softwaru, což umožní verifikaci modelu pomocí řady úloh a realizaci praktických výpočtů.
- **Provést verifikaci navržené metodiky pomocí vhodné navržených experimentálních měření a výpočtových úloh.** Má-li být navržená metodika použitelná pro praktické aplikace, je důsledná verifikace veškerých navržených postupů nezbytná. Při verifikaci bude kladen důraz na úlohy s nehomogenním polem napjatosti. Přesnost predikce není možné posoudit pouze při jednoosém tahu.

Metodika měření zbytkových mechanických vlastností

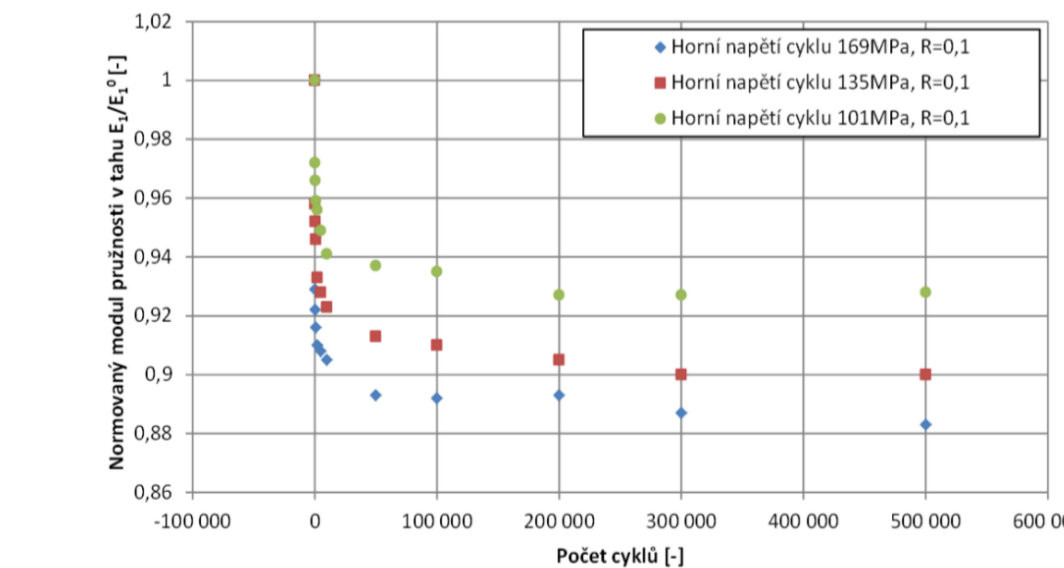
Metodika měření zbytkového modulu pružnosti v tahu

Při návrhu metodiky se vycházelo z dostupných normalizovaných postupů ASTM D3039 / D3039M - 17 a dále ASTM D3479 / D3479M - 12. Základní myšlenka navrženého postupu je taková, že je realizováno cyklické zatěžování zkusebního tělesa a po absolvování předem definovaného počtu cyklů je únavově zatěžování přerušeno a je provedena statická tahová zkouška dle ASTM D3039 / D3039M - 17 při níž jsou změřeny žádané veličiny. V rámci práce jsou řešeny první dvě oblasti této křivky - tedy počáteční náhlý pokles a dále následující přibližně lineární pokles. Třetí, nelineární stádium, které odpovídá rychlému růstu poškození a končí lomem, řešeno není. Uvedené poznatky byly zveřejněny v rámci vlastních publikací [D8], [D10] a [D11].

Pro posouzení, zda navržená metodika splní očekávání, byly realizovány únavové zkoušky s celkem dvanácti zkusebními tělesy na třech hladinách zatížení. Zátěžné cykly měly součinitelem asymetrie 0,1 a horní napětí cyklu odpovídalo 169 MPa, 135 MPa a 101 MPa. Cílem těchto experimentů je získat informace o velikosti poklesu modulu pružnosti v závislosti na počtu cyklů a hladině zatížení. Aby bylo dobře zřejmé, jak se liší zbytkový modul po určitém počtu cyklů na různých hladinách zatížení je vhodné data prezentovat v normovaném tvaru. Ten lze určit tak, že se hodnoty zbytkového modulu pružnosti vztáhnou k počáteční (panenské) hodnotě.

Je známým faktem, že únavové charakteristiky vykazují samy o sobě vysoké rozptýlení a bylo nutné minimalizovat vliv dalších nepřesností zanesených při statických zkouškách. Hrozilo nebezpečí, že se nepodaří nalézt statisticky významné rozdíly mezi výsledky jednotlivých hladin zatížení. Vzhledem k tomu byl navržen postup, kdy na každé hladině zatížení jsou zkoušena čtyři zkusební tělesa. U každého tělesa je nejdříve změřen panenský modul pružnosti a modul je dále proměřen vždy po absolvování předem definovaného počtu cyklů. Každé toto statické měření zbytkového modulu pružnosti v tahu je navíc zopakováno třikrát. Aplikaci tohoto postupu je získáno dvanáct hodnot zbytkového modulu pružnosti pro každý počet zátěžných cyklů. V rámci prvních experimentů bylo navrženo křivku zbytkového modulu proměřit v celkem 11 bodech, které odpovídají následujícím počtům zátěžných cyklů: 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10 000, 50 000, 100 000, 200 000, 300 000 a 500 000. Příklad zpracování dat je uveden v tab. 1. Grafické zpracování všech dat je uvedeno na obr. 1.

n	0		200		500		1000		2000		5000		10000	
	σ_{max} [MPa]	R	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0
TS89	169	0,1	1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,917	0,914	0,917	0,916	0,917	0,916	0,917	0,916	0,917	0,916	0,917
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
TS89	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	
TS810	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	
			1,000	0,941	0,925	0,926	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	
			1,000	0,941	0,925	0,926	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	
			1,000	0,941	0,925	0,926	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925	
TS811	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	
Aritmetický průměr	-	0,928	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922		
	-	0,929	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922			
Statistická odchylka	-	0,009	0,007	0,011	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010	0,008	0,010		
	-	1,021	0,718	1,190	0,905	1,748	0,905	1,748	0,905	1,748	0,905	1,748		
Variační koeficient (%)	-	0,940	0,925	0,943	0,938	0,939	0,938	0,939	0,938	0,939	0,938	0,939		
	-	0,940	0,925	0,943	0,938	0,939	0,938	0,939	0,938	0,939	0,938	0,939		

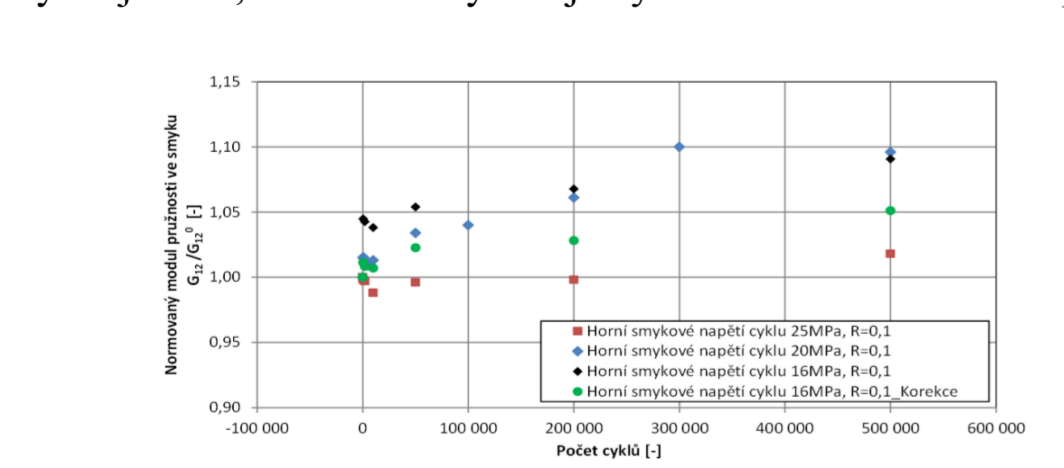


Obr. 1. - Normované moduly pružnosti v závislosti na počtu cyklů na třech hladinách zatížení s horním napětím cyklu 169 MPa, 135 MPa a 101 MPa a součinitelem asymetrie cyklu 0,1.

Tab. 2. - Výsledky testování shody aritmetických průměrů a rozptýlení zbytkového modulu pružnosti na hladině se součinitelem asymetrie cyklu 0,1 a horním napětím cyklu 135 MPa a 169 MPa.

n	200		500		1000		2000		5000		10000	
	σ_{max} [MPa]	R	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0	E/E_0
TS810	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
TS811	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
TS89	169	0,1	1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
			1,000	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
			1,000	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918	0,918
TS810	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
TS811	169	0,1	1,000	0,932	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931	0,931
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
			1,000	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924	0,924
F-test	-	0,11258	0,40433	0,64827	0,64829	0,61658	0,67553	0,61658	0,67553	0,61658	0,67553	
	-	3,18E-8	5,84E-8	1,83E-8	1,83E-8	6,00E-8	1,00E-8	1,00E-8				

Při DMA analýze se standardně vyhodnocuje tzv. komplexní dynamický modul pružnosti, kde jeho reálná část, tzv. Storage modulus je veličina srovnatelná s obecně známým elastickým modulem pružnosti. Na vislé ose v příslušných obrázcích je proto uvedeno „Storage modulus“. Příklad výsledku je uveden v obr. 3. Potvrdilo se, že při cyklickém zatěžování dochází k růstu modulu pružnosti matrice a toto chování se vyskytuje u zkusebních těles dotvrzených při obou teplotách 50°C a 120°C. Zároveň bylo zřejmé, že matrice vykazuje významnou závislost na teplotě. Toto chování bylo potvrzeno u více typů epoxidových smol.



Obr. 3. - Závislost modulu pružnosti matrice Araldit LY5052 s tvrdidlem Aradur 3052 dozrvené při 50°C na čas (počtu cyklů) a přibližně teploty při zkoušce.

Za předpokladu správnosti hypotézy o více mechanismech ovlivňujících výslednou odezvu kompozitu, z nichž jeden je rozvoj poškození matrice, by měl být patrný rozdíl v jejím poškození mezi jednotlivými hladinami zatížení. Z toho důvodu bylo provedeno pozorování povrchu zkusebních těles pomocí digitálního mikroskopu. Na obr. 4 jsou zobrazeny povrchy zkusebních těles při dvacetinásobném zvětšení. Tyto fotografie byly pořízeny na tělesech s orientací vyztuže ([-45]s) po zatížení 5.10⁶ cyklů na hladinách s horním smykovým napětím 16 MPa, 20 MPa a 25 MPa. Zde se jednoznačně potvrzuje, že na povrchu nejvíce zatíženého tělesa (fotografie vpravo) je rozvíjeno významné poškození, zatímco na obou nižších hladinách nebylo naopak pozorováno aparát detekované poškození žádné. Jedná se o trhliny v matici orientované pod úhlem 45°. Bůž se v souladu s výsledky měření změn tuhosti laminátu, kde na hladině s horním smykovým napětím 25 MPa byl rozvoj mechanismu způsobující pokles výrazný. Vzhledem k výše popsaným výsledkům, které vznikly měřením změn modulu pružnosti samotné matrice a pozorováním poškození povrchu zkusebních těles, které koreponduje s výslednou odezvou kompozitu lze hypotézu o více mechanismech ovlivňujících odezvu zkusebních těles považovat za potvrzenou.

Nelze vyloučit, že výsledná změna mechanických vlastností matrice a tím i odezva laminátu je ovlivněna i jevy, které vznikají v důsledku interakce na rozhraní vlákna a matrice – např. lokální koncentrace napětí. V literatuře je opakovaně zmiňováno, že chování matrice samotné a matrice v podobě konstituentu se mnohdy výrazně liší. Bůž se nepodařilo detailněji popsat mechanismus růstu tuhosti matrice z výsledků vzájemně závěr, že v intervalu přijatelných hladin zatížení nedochází k poklesu, ale spíše k růstu modulu pružnosti ve smyku.

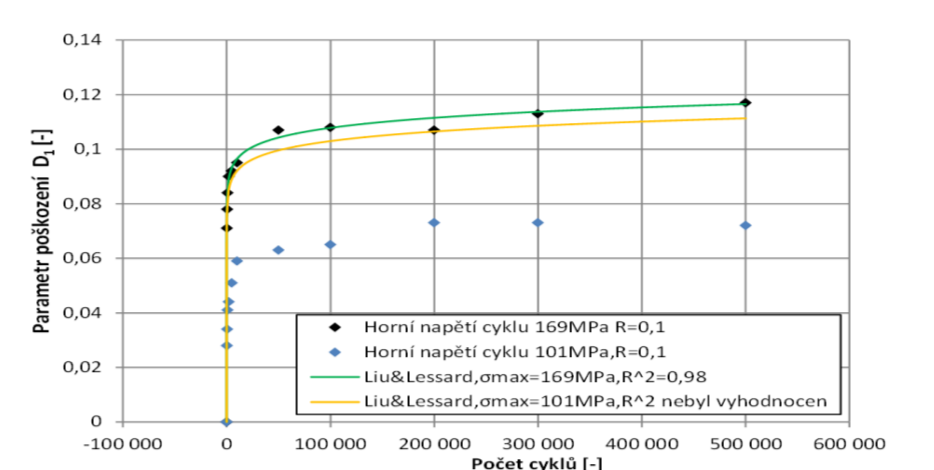
Obr. 4. - Závislost modulu pružnosti matrice Araldit LY5052 s tvrdidlem Aradur 3052 dozrvené při 50°C na čas (počtu cyklů) a přibližně teploty při zkoušce.

Návrh modelu poklesu tuhosti a verifikace

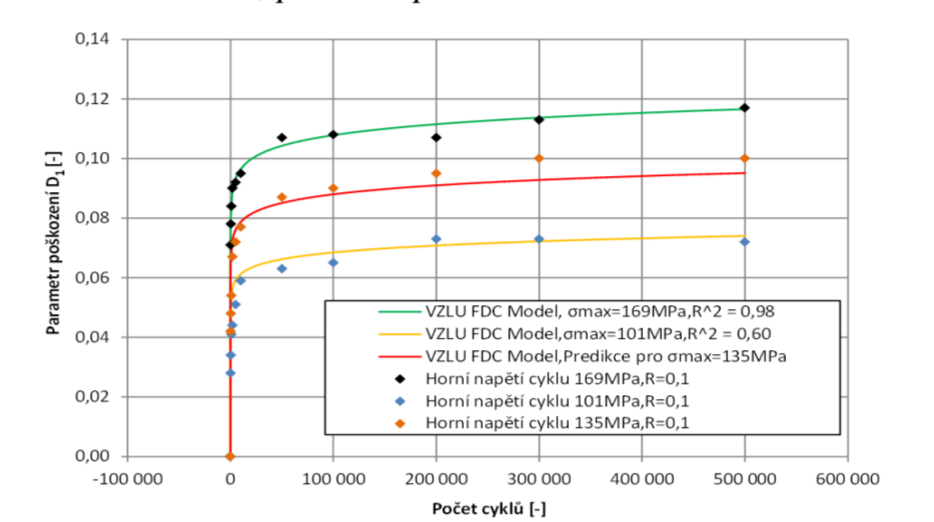


Obr. 4. - Detail povrchu matrice zkusebních těles se skladbou [(+45)J] po zatížení 5.10⁶ cyklů na hladinách s horním smykovým napětím cyklu 16 MPa, 20 MPa a 25 MPa (zleva).

Žádná zjednodušená nejsou přípustná, protože pokles tuhosti je řešen na úrovni matice a jejich skutečný stav napjatosti musí být zohledněn. Navržený model poklesu tuhosti lze v diferenciálním tvaru obecně formulovat pomocí následující rovnice.



Obr. 5. - Regrese dat modelem Liu a Lessard pro hladinu 169 MPa, predikce pro hladinu 101 MPa



Obr. 6. - Regrese dat modelem Liu a Lessard pro hladinu 169 MPa a 101 MPa, predikce pro hladinu 135 MPa

Za účelem uspokojivé regrese pro různé hodnoty hladiny zatížení (ovšem pro stejnou hodnotu součinitele asymetrie cyklu) je výše uvedený model v rámci této práce modifikován. Uspokojivější regrese více hladin zatížení je dosaženo