

NUMERICKÁ SIMULACE S VYUŽITÍM ELASTOPLASTICKÉHO MATERIÁLOVÉHO MODELU S POŠKOZENÍM A JEJÍ EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

Tomáš Mandys*, Vladislav Laš, Jan Krystek

Západočeská univerzita v Plzni, Technická 8, 301 00 Plzeň, Česká Republika

Abstrakt

Príspevek je zaměřen na ověření autory navrženého elastoplastického materiálového modelu s poškozením určeného primárně pro tkaninové kompozity. Vedle popisu principu materiálového modelu a způsobu provedení identifikace potřebných materiálových parametrů je v příspěvku prezentováno srovnání numerických simulací s experimentálními daty získanými z testování geometricky složitějších vzorků, u kterých během zatěžování vznikala složitější kombinace poškození a plastické deformace.

1. Úvod

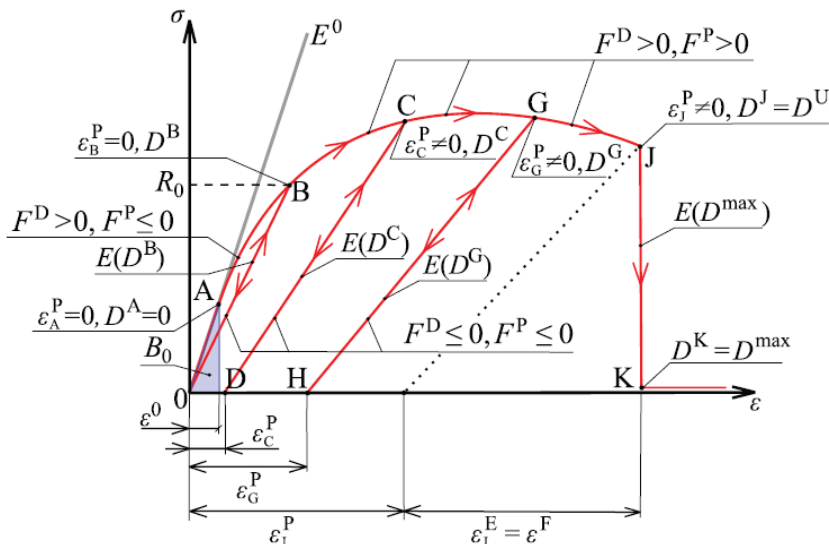
Kompozitní materiály nacházejí stále širší uplatnění v řadě průmyslových odvětví, jakými jsou např. dopravní průmysl a energetika. Za největší přednosti, které se podílejí na úspěšných aplikacích kompozitních materiálů, jsou zejména jejich vysoký poměr mezi tuhostí a výslednou hmotností, odolnost proti korozi a flexibilita návrhu. Hlavní nevýhodou těchto materiálů je jejich náchylnost na vznik poškození, které nevratně snižuje tuhost materiálu a má negativní vliv na životnost celé konstrukce. Experimentální testy na tkaninových kompozitech již v minulosti potvrdily nelineární chování těchto materiálů a to zejména ve smykové oblasti se vznikem elastoplastického chování [1]. Vhodnost použití kompozitních materiálů pro nové průmyslové aplikace je nejčastěji prokazována pomocí numerických simulací. Materiálové modely, které jsou používány pro modelování kompozitních materiálů v komerčních MKP softwarech, jsou nejčastěji založeny na lineárních elastických modelech orthotropního materiálu. Rozšíření znalostí a použití pokročilejších materiálových modelů, které by vhodnějším způsobem popisovaly skutečné chování kompozitních materiálů, povede k věrohodnějším ověření vhodností jejich aplikací a bude otevírat nové možnosti pro jejich rozšíření v dalších průmyslových oblastech.

2. Elastoplastický materiálový model kompozitního materiálu s poškozením

Pro popis nelineárního chování tkaninového kompozitu byl autory v souladu s termodynamickými principy navržen hyperplastický materiálový model orthotropního materiálu s poškozením [2]. Model využívá aditivního rozkladu celkové logaritmické deformace elastoplastického chování materiálu na elastický $\boldsymbol{\epsilon}^E$ a plastický $\boldsymbol{\epsilon}^P$ tenzor deformace při uvažování velkých deformací [3]. Stav a rozvoj plasticity a poškození v materiálu je realizován pomocí disipační funkce plastického potenciálu F^P a vektoru disipačních funkcí potenciálu poškození \mathbf{F}^D , kde jednotlivé disipační funkce v daném případě představují funkce popisující ztrátu energie materiálu v důsledku vzniku a rozvoje nevratných procesů

* tel. +420 377 632 306, e-mail: tmandys@ntis.zcu.cz

v termodynamickém systému. Pro matematický popis elastoplastického chování navrženého modelu je uvažován model izotropního zpevnění [4]. Princip celého materiálového modelu kombinujícího elastoplastické chování materiálu s poškozením je pro případ jednoosé tahové cyklické zkoušky znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1. Elastoplastický materiálový model s poškozením v případě jednoosého cyklického zatížení.

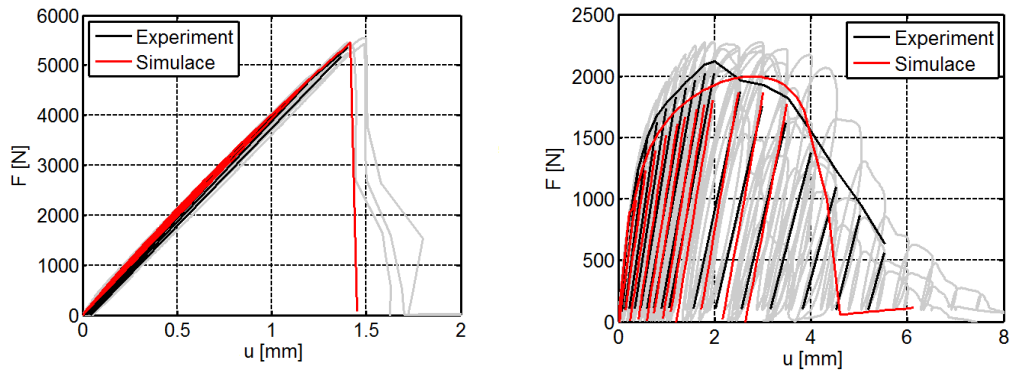
3. Tkaninový kompozit a identifikace materiálových parametrů

Testovaný tkaninový kompozit o celkové tloušťce 0,9 mm byl vyroben ze tří vrstev plátňové vazby ze skelného vlákna o hustotě 816 g/m² a epoxidové pryskyřice Epicote MGS 385LR. Celkem byly uvažovány 4 typy vzorků, které se vůči sobě lišily úhlem φ , které představoval úhel mezi hlavním materiálovým směrem 1 a směrem zatěžování. Daný úhel φ činil 0° až 45° s krokem 15°. Podle daného úhlu pak byly materiálové vzorky označeny, tj. T0 až T45. Na materiálových vzorcích byly provedeny experimentální cyklické tahové zkoušky a tlakové zkoušky podle ASTM norem. Dané experimentální výsledky byly zpracovány pomocí aplikace ploTRA [5] a dále využity pro identifikaci materiálových parametrů testovaného materiálu za využití matematické optimalizace. Výsledné tahové diagramy skelného tkaninového kompozitu jsou pro vzorky T0 a T15 znázorněny na Obr. 2, resp. na Obr. 3 pro vzorky T30 a T45. Šedé křivky na obrázcích znázorňují původní nezpracovaná experimentální data.

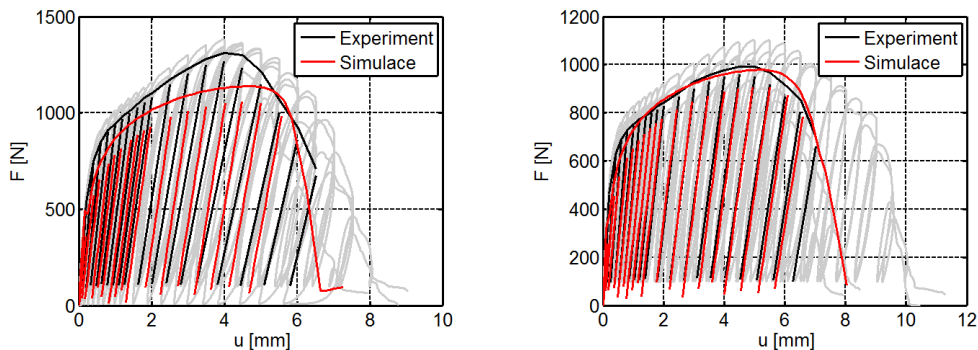
4. Verifikace materiálové modelu a materiálových parametrů

Navržený materiálový model byl ověřen tahovou zkouškou na složitější geometrii v podobě perforovaného vzorků, kde vzniká složitější kombinace poškození a plastické deformace materiálu při zatěžování v porovnání s běžnými testovacími vzorky. Geometrie perforovaného vzorku je znázorněna na Obr. 4. Celkem byly testovány čtyři druhy vzorků, které se vůči sobě lišily opět pouze orientací hlavního materiálového směru 1 se směrem zatěžování, tj. úhlem φ kdy jeho rozsah a krok byl shodný se vzorky v předešlé kapitole, vzorky nesly označení TH0, TH15, TH30 a TH45. Testovány byly vždy tři vzorky od každého druhu. Zatížení bylo realizováno na zkušebním zařízení Zwick Roell Z050, rychlost zatěžování činila 1 mm/min.

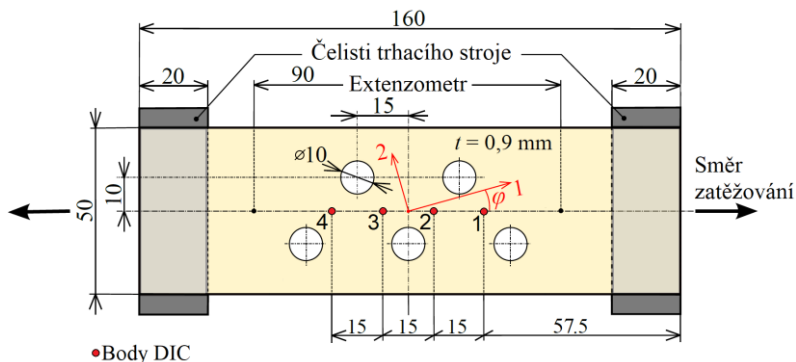
Zatěžování vzorků bylo realizováno až do vzniku viditelného poškození vzorků a dosažení poklesu zatěžovací síly na 20% její maximální hodnoty.



Obr. 2. Výsledné tahové diagramy skelného tkaninového kompozitu pro vzorky T0 (vlevo) a T15 (vpravo).



Obr. 3. Výsledné tahové diagramy skelného tkaninového kompozitu pro vzorky T30 (vlevo) a T45 (vpravo).

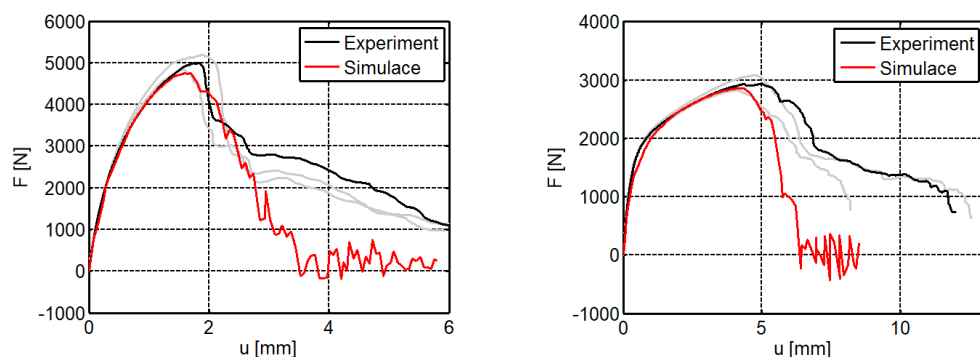


Obr. 4. Geometrie zkušebních vzorků umožňující složitější kombinaci rozvoje poškození a plastické deformace během tahového zatěžování.

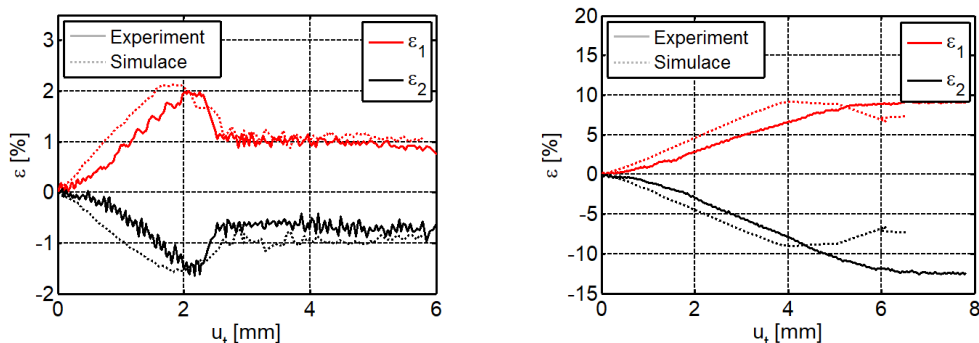
Rozložení deformace na povrchu zkušebních vzorků během zatěžování bylo analyzováno bezkontaktně použitím fotogrammetrického zařízení založeného na digitální korelaci obrazu (DIC). Použitý 3D optický systém se skládal ze čtyř digitálních kamer s vysokým rozlišením (4 MPix), snímací frekvence činila 0.2 Hz. Rozložení deformace během zatěžování bylo analyzováno v podobě hlavních logaritmických deformací (true principal strains). Vedle vizuální analýzy rozložení deformace po plochách testovacích vzorků bylo vždy ve čtyřech stanovených bodech na vzorku provedeno velikostní vyhodnocení – viz body DIC na Obr. 4. Alternativně k DIC bylo využito průsvitnosti testovaných vzorků a pomocí silného zdroje světla byly na vzorcích během zatěžování zachycovány vznikající strukturální změny.

Získané výsledky byly porovnány s výsledky provedených numerických simulací s uvažováním velkých deformací. Při simulacích bylo pro zajištění konvergence výpočtů uvažováno mazání prvků MKP sítě. Srovnání tahových diagramů (závislost zatěžující síly F na velikosti posunutí u z extenzometru) pro perforované vzorky TH15 a TH45 jsou znázorněny na Obr. 5. Experimentálně získaná data ze zatěžovacího stroje nebyly zpracována, černé křivky odpovídají vzorkům, kdy byla provedena DIC analýza, šedé křivky zobrazují výsledky, kdy bylo pro zachycení strukturálních změn použito jejich prosvěcování. Křivky závislosti velikosti vznikající deformace na velikosti celkového posunutí u_t jsou pro stejné druhy vzorků znázorněny na Obr. 6. V obou případech se jedná o výsledky v sledovaném bodě 1 – viz body DIC na obr. 4. V daném případě jsou znázorněny výsledky maximální ε_1 a minimální ε_2 hlavní logaritmické deformace. Celkové posunutí u_t odpovídá posunutí čelistí zatěžovacího stroje a je odlišné od posunutí extenzometru u .

Na obr. 7 a obr. 8 je uvedeno srovnání rozložení deformace z prosvíceného vzorku a pole deformace získané analýzou DIC s výsledky numerické simulace. V případě obr. 7 je znázorněn vzorek TH15 s vykresleným polem rozložení minimální hlavní logaritmické deformace ε_2 při vzniku porušení vzorku. Obdobně na Obr. 8 je zobrazeno porovnání rozložení pole deformace na vzorku TH45 v podobě složky maximální hlavní logaritmické deformace ε_1 a to opět při porušení vzorku.



Obr. 5. Výsledné tahové diagramy skelného tkaninového kompozitu pro vzorky T30 (vlevo) a T45 (vpravo).



Obr. 6. Závislosti velikosti maximální ε_1 a minimální ε_2 hlavní logaritmické deformace na celkovém posunu vzorku u_t ve sledovaném bodě 1 mezi experimentem a numerickou simulací pro vzorky T30 (vlevo) a T45 (vpravo).

5. Závěr

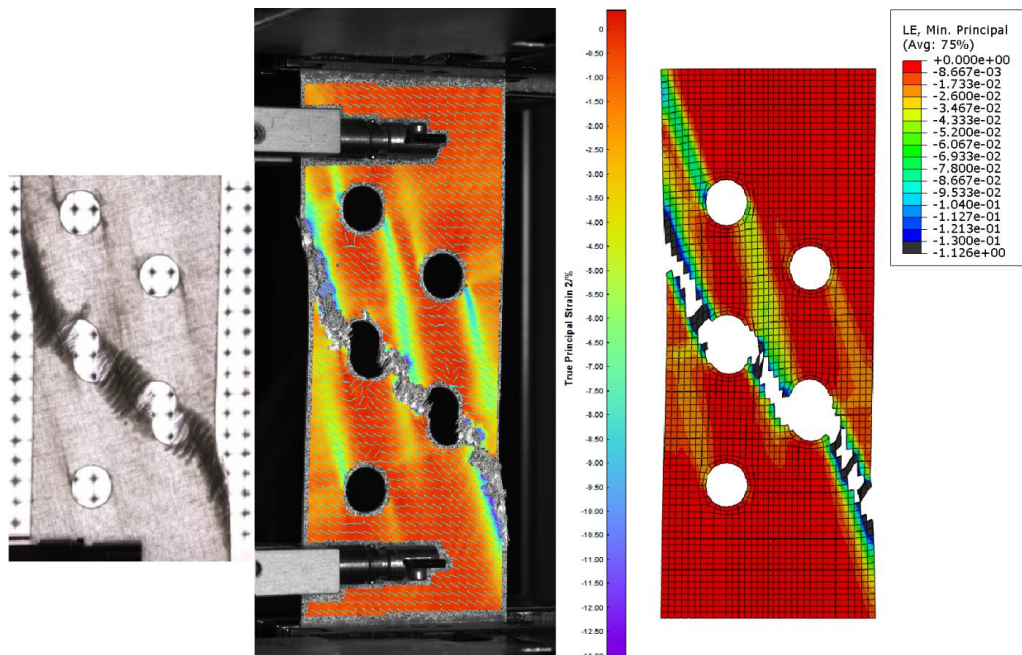
Pomocí složitější geometrie zkušebních vzorků bylo provedeno ověření schopností navrženého hyperplastického materiálového modelu s porušením pro tkané kompozity. Materiálový model je implementován do komerčního MKP softwaru Abaqus a numerické simulace poskytují výsledky, které se dobře shodují se zjištěnými experimentálními daty. Tahové diagramy ukazují minimální rozdíly mezi experimenty a numerickými simulacemi až do dosažení maximálních sil během zatěžování. K celkovým poškozením vzorků dochází pouze v případě numerických simulací, při experimentech vykazují vzorky mezi jednotlivými částmi v místech poškození vláknová přemostění. Tato skutečnost je patrná na tahových diagramech po překročení maximálních zatěžovacích sil. Vizuální srovnání rozložení deformace na plochách jednotlivých typů vzorků vykazuje kvalitativní i kvantitativní schodu mezi daty z numerických simulací a daty získanými při experimentech pomocí analýzy DIC.

Poděkování

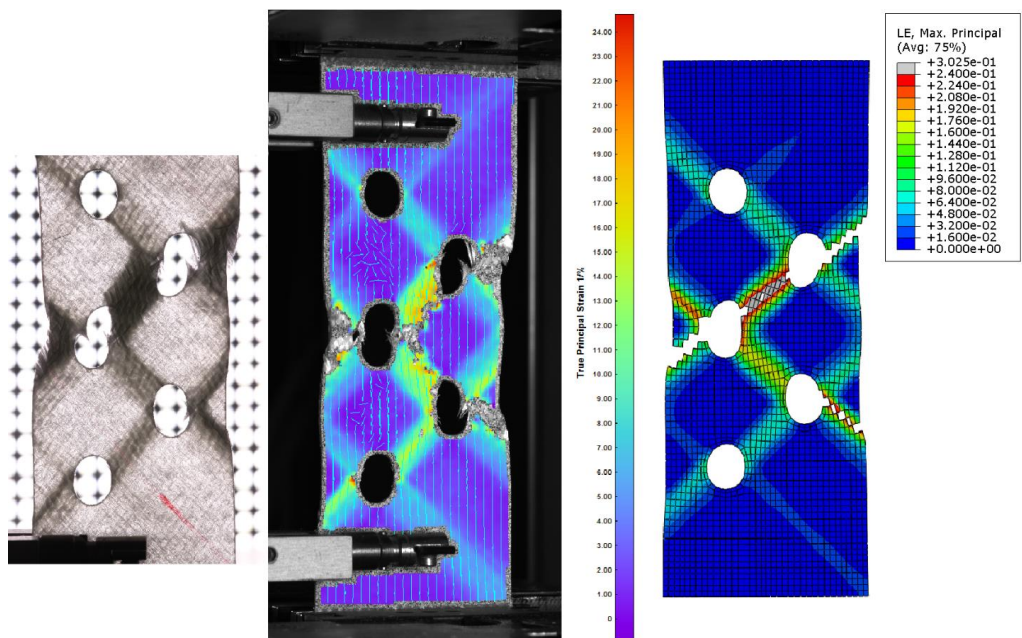
Tato práce byla podpořena projektem SGS 2022 – 008.

Literatura

- [1] Kroupa T., Kunc K., Zemčík R., Mandys T., The non-linear finite element simulation of tensile test of textile composites. *Materials and Technology* 49, pp. 509-514, 2015.
- [2] Mandys T., Kroupa T., Laš V., Lobovský L., Hyperplastic material model with damage for woven composites, *Composite Science and Technology* 183, 2019.
- [3] Caminero M.Á., Montáns F.J., Bathe K.J., Modeling large strain anisotropic elastoplasticity with logarithmic strain and stress measure, *Computers & Structures* 89, pp. 826-843, 2011.
- [4] de Souza Neto E.A., Perić D., Owen D.R.J., *Computational Methods for Plasticity – Theory and Applications*. John Wiley and Son Ltd., UK, 2008.
- [5] Kunc K., Implementace elasto-plastického modelu s degradací materiálových parametrů pro textilní kompozity do komerčního MKP softwaru. Diplomová práce, ZČU v Plzni, Plzeň, 2013.



Obr. 7. Vizuální porovnání výsledků pro vzorek TH15 při posunutí $u = 4.0$ mm. Vlevo prosvětlený vzorek, uprostřed pole minimální hlavní logaritmické deformace ε_2 zanalyzované na vzorku pomocí DIC, vpravo výsledek numerické simulace.



Obr. 8. Vizuální porovnání výsledků pro vzorek TH45 při posunutí $u = 7.0$ mm. Vlevo prosvětlený vzorek, uprostřed pole minimální hlavní logaritmické deformace ε_1 zanalyzované na vzorku pomocí DIC, vpravo výsledek numerické simulace.