



NUMERICKÉ OVEROVANIE VLASTNOSTÍ SENDVIČOVÝCH KOMPOZITOV POMOCOU PROGRAMU LS-DYNA

Alexandra BAKIČ

NUMERICAL VERIFICATION OF PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE MATERIALS USING THE LS-DYNA PROGRAM

HISTÓRIA ČLÁNKU

Doručený: 17. 05. 2021

Schválený: 20. 12. 2021

Vydaný: 31. 12. 2021

ABSTRAKT

Composite materials are one of the most progressively evolving materials today. One of the important elements of the research of these materials is also numerical calculations, which help to determine the resulting properties of the material. The aim of this work is to approach the process of creating the configuration of composite materials using simulations in the LS-DYNA program. The article introduces the system of creating numerical calculations and the use of experimental measurements to reduce the input costs of production and achieve the most accurate simulations.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Composite materials, sandwich composites, composite armor, contact explosion, LS-DYNA



© 2021 by Author(s). This is an open access article under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

ÚVOD

V 21. storočí je adaptabilita a modernizácia vojenskej techniky v modernom asymetrickom boji jedným z kľúčových prvkov. Obranný priemysel po celom svete vynakladá enormné prostriedky na výskum nových technológií a materiálov. Vďaka novým materiálom dochádza k napredovaniu vývoja pancierovania, ktoré reflektuje požiadavky na účinnú ochranu pred dynamicky vyvíjanými novými druhmi munície. Zatiaľ čo u balistickej ochrany jednotlivca v podobe nepriestrelnej vesty a prilby dosahuje váha až 30 % celkovej záťaže vojaka, u vozidiel nie je možné navyšovať hmotnosť pancierovania bez toho, aby boli ohrozené základné manévrovacie schopnosti vozidla.

Môžeme konštatovať, že v dnešnej dobe prebieha výskum a výroba nových odolných typov pancierovania pomerne rýchlo. Tento stav je spôsobený najmä tým, že nové konfigurácie a materiály panciera sa radikálne nelíšia od tých, ktoré sú už v praxi účinné. V prípade nepostačujúcej pancierovej ochrany, ktorá bola prekonaná novým druhom munície alebo hrozby, dochádza k prepracovaniu konceptu pancierovej ochrany. Pod týmto pojmom môžeme rozumieť vytvorenie novej konfigurácie materiálu a tiež geometrie pridaním ďalších hrúbok vrstiev v existujúcej konfigurácii panciera. Ďalším riešením, avšak najmenej pravdepodobným je úplne nový dizajn a prepracovanie materiálu panciera výberom zo súboru dostupných materiálov a ich kombinácií s overenými balistickými vlastnosťami. Tvorba novej materiálovej konfigurácie prebieha zriedka, nakoľko ich odolnosť je možné overiť iba simuláciou a výskumným prostredím, nie však skutočným bojovým nasadením. Výskumné prostredie a simulácie počítajú so vstupnými údajmi ako sú tvrdosť, pevnosť a húževnatosť. Tieto parametre však v skutočných podmienkach môžu vykazovať rozdielne vlastnosti pri balistickej záťaži a záťaži spôsobenej výbuchom.

Cieľom príspevku je vytvorenie simulačného modelu v programe LS-DYNA, ktorý bude slúžiť ako primárna skúšobná metóda pri zisťovaní vlastností sendvičových kompozitných materiálov. Príspevok približuje postup tvorby simulačného modelu popisujúceho priebeh zaťaženia a deformáciu plátu kompozitného materiálu pri zaťažení výbuchom.

Prepracovaný model môže značným spôsobom znížiť náklady a do istej miery nahradiť potrebu mechanických skúšok materiálu. Model môže byť následne použitý v podmienkach domáceho obranného priemyslu pri tvorbe koncepcií nových vozidiel a ich dielov. Myšlienkou príspevku je ponúknuť inovatívny prístup k riešeniu problematiky použitia nových perspektívnych materiálov a ich použitia v podmienkach Ozbrojených síl Slovenskej republiky. Súčasný prístup pri konštrukcii vozidiel sa spolieha na zavedené a používané materiály bez efektívneho prispôsobenia vozidiel a ich nadstavieb cieľovému použitiu.

1 VÝBER MATERIÁLU PRE ŠPECIÁLNE APLIKÁCIE

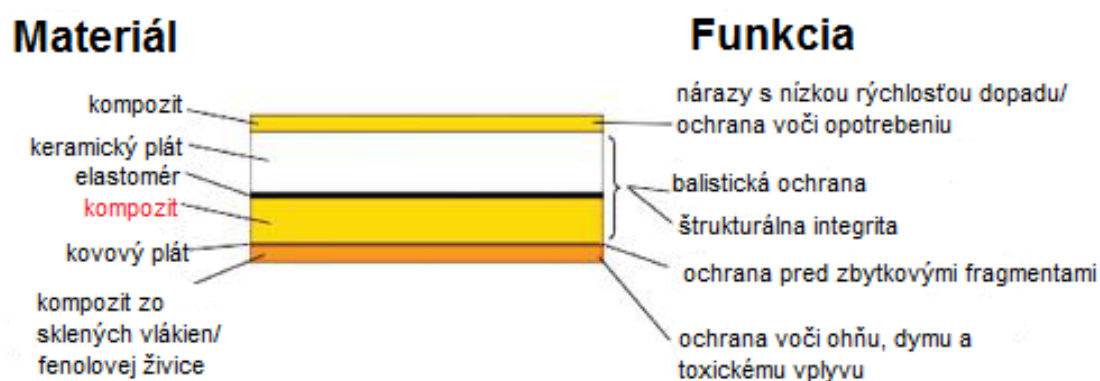
Pancierovanie má v bojových podmienkach primárnu úlohu chrániť personál a techniku pred letiacimi projektilmi a fragmentami nástražných výbušných systémov. Nástražné výbušné systémy sú v súčasných konfliktoch (Irak, Sýria) vyrábané z delostreleckej munície. Tento fakt špecifikoval požiadavku moderných pancierovaní vozidiel, ktoré potrebujú silnú balistickú ochranu na dne korby vozidla. (Timárová, 2016)

Štruktúra pancierového systému vozidla závisí najmä od jeho cieľového použitia. Pri dizajnovaní pancierovania vozidla je potrebné špecifikovať predpokladané hrozby, ktorým bude vozidlo počas svojej prevádzky vystavené. Dôležitým faktorom je aj maximálna hmotnosť vozidla. Celosvetovo historicky používaným materiálom pre výrobu pancierovania vozidiel je samozrejme oceľ, ktorej veľkou nevýhodou je práve vysoká hmotnosť. Súčasný kompozitný materiál ponúkajú porovnateľné pevnostné parametre pri oveľa nižšej hmotnosti. Navyšovanie hmotnosti môže mať za následok zníženú mobilitu, alebo dokonca stratu

bojových schopností, ako je napríklad schopnosť plavby. Ďalším využiteľným prvkom moderných bojových vozidiel je reaktívne a aktívne pancierovanie vo forme inteligentných materiálov, alebo elektromagnetických ochranných mechanizmov. Pasívne pancierovanie je však stále dôležitým prvkom náročným na vývoj a správne usporiadanie vrstiev, z ktorých každá vrstva má špecifickú úlohu. Vzájomné uloženie vrstiev je individuálne a závisí od záverečnej aplikácie. Správna kombinácia vrstiev ako celok poskytuje viacero funkcií (Obrázok 1). (Timárová, 2016)

Prvá vrstva má štandardne v pancierovaní za úlohu absorbovať prvotnú energiu a deformovať strelu, čo obmedzí jej prienik hlbšie do pancierovania. Tento koncept bol vyvinutý už v období 2. svetovej vojny.

Zadná vrstva panciera síce nie je vystavená priamo nárazu projektilu, je však vystavená prenesenej kinetickej energii, ktorá sa šíri vrstvami panciera po náraze. V minulosti sa pri nesprávnej voľbe materiálu zadnej vrstvy panciera stávalo, že dochádzalo k poškodeniu tejto vrstvy a jej úlomky sa následne rozleteli smerom do interiéru vozidla a ohrozovali tak posádku a vybavenie. Dizajnovanie pancierovania preto vyžaduje veľkú pozornosť pri každej z vrstiev.



Obrázok 1 Schematické zobrazenie pasívneho panciera používaného v bojovej technike

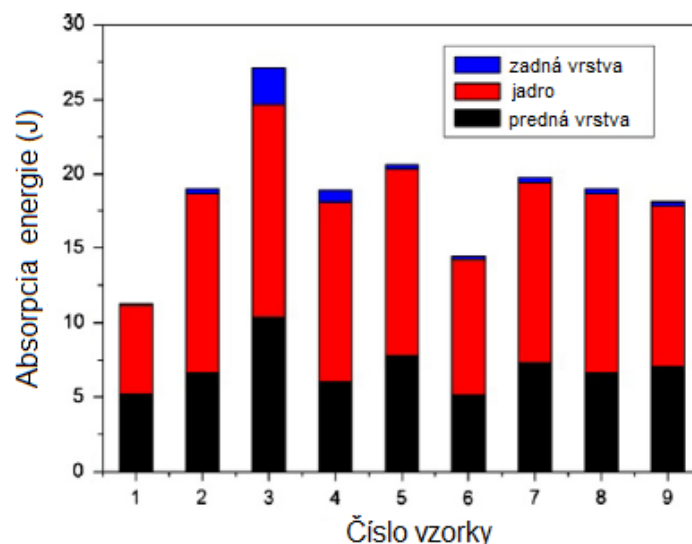
Zdroj: (Timárová, 2016)

Vývoj kompozitného pancierovania prebieha na približne rovnakom princípe vrstvenia rôznych druhov materiálov. Všeobecne môžeme povedať, že v kompozitných materiáloch sú výsledné mechanické vlastnosti ovplyvnené nielen fyzikálnym a chemickým zložením plniva matrice, ale aj percentuálnym podielom jednotlivých zložiek, ich vzájomným uložením a spôsobom spracovania výsledného sendviča. V sendvičových kompozitných štruktúrach sú interakcie medzi jadrom a povrchovými vrstvami veľmi dôležitým prvkom pri určovaní vlastností.

Z výsledkov štúdií vyplýva, že väčšina nárazovej energie je absorbovaná vrchnou vrstvou a jadrom sendviča a to aj napriek geometrickým vlastnostiam, ako je napríklad tvar dopadajúcej strely. Hrúbka vrchnej časti panciera a relatívna hustota jadra majú veľký vplyv na schopnosť absorpcie energie sendvičovej štruktúry. Je dôležité poznamenať, že hodnota absorpcie energie nie je monotónna, a nie je priamo úmerná hrúbke povrchovej vrstvy.

Dokazuje to aj výskum Dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores under blast loading—Numerical simulations od Jing. L a kol. publikovaný v roku 2013 pri ktorom boli zaťaženiu vystavené vzorky s rôznou hrúbkou povrchovej vrstvy.

Táto štúdia preukázala, že najlepšia schopnosť absorpcie energie bola zaznamenaná u sendvičovej štruktúry s povrchovou vrstvou s hrúbkou 0,8 mm. Horšie výsledky vykazovala štruktúra s povrchovou (prednou) vrstvou s hrúbkou 0,5 mm a najhoršie pri hrúbke 1,0 mm. (Jing, 2013)



Graf 1 Absorpcia energie u vzorky kompozitných sendvičov

Zdroj: (Jing, 2013)

V posledných rokoch sa v sendvičových štruktúrach čoraz viac používajú jadrá, ktoré sú schopné eliminovať šmykové medzi-povrchové napätie na rozhraní jadra a povrchovej vrstvy. Avšak pri využívaní konceptu vrstvených sendvičov je nevyhnutný výskum zameraný na odolnosť voči rôznym zaťaženiam a penetráciám. Z doterajších výskumov jednoznačne vyplýva, že nie je možné predpovedať mechanické vlastnosti ako je odolnosť voči nárazu pre určitý typ sendvičového kompozitu bez numerických simulácií a praktických testov. Odolnosť povrchových vrstiev, ako aj odolnosť jadra sendvičového kompozitu sa líši v závislosti od tvaru a hrúbky jednotlivých prvkov.

Pri konštrukciách sendvičového pancierovania sa na výrobu povrchových vrstiev a jadra používajú najmä kovové materiály. V tomto príspevku sa však budeme zaoberať simulačným modelom vytvoreným so vzorkou materiálu AIREX C 70.90, ktorý je polyvinyl-chloridovou (PVC) penou používanou v civilných aplikáciách ako materiál pre jadrá sendvičových kompozitov. Tento materiál sa v kombinácii s inými vrstvami kompozitného materiálu vyznačuje vysokou tuhosťou. V konštrukcii pancierovania by mohol byť súčasťou kompozitného plátu, ktorého funkciou je najmä balistická ochrana (Obrázok 1).

2 EXPERIMENTÁLNE MERANIA A NUMERICKÉ METÓDY VÝSKUMU

Experimentálny výskum môže poskytnúť víziu vplyvu zaťaženia a formy poškodenia a je účinný pri získavaní základných údajov potrebných na ďalšiu analýzu. Z experimentálnych skúšok viacerých výskumov vyplýva, že rozdiel medzi statickým zaťažením a nárazom nízkou rýchlosťou je väčší v prípade sendvičových štruktúr s hrubšími povrchovými vrstvami. Anderson a kol. vykonali skúšky na určenie typu a rozsahu poškodenia povrchových vrstiev grafitovo-epoxidového sendviča s voštinovým jadrom v porovnaní s penovými jadrami pri nárazoch s nízkou rýchlosťou a vyhodnotili dve formy poškodenia, ktoré sa vyskytovali so zvyšujúcou sa nárazovou energiou. U oboch typov jadier dochádzalo k približne rovnakým typom delaminácie a poškodení povrchu v mieste pôsobenia nárazu. (Anderson, 2000)

Hazizan a kol. študovali odolnosť sendvičových kompozitov zložených z povrchových vrstiev sklenených vlákien a epoxidovej živice s hliníkovým jadrom. Ich experimenty naznačili, že rozloženie dopadovej energie bolo významne ovplyvnené geometriou strely. (Hazizan, 2003)

Ivañez a kol. uskutočnili experimenty týkajúce sa poškodenia kompozitných sendvičových štruktúr s voštinovým jadrom pri aplikácii zaťaženia so šikmým nárazom s nízkou rýchlosťou. Výskum dokazuje, že pri uhloch nárazu projektilu menších ako 15° sú výsledky takmer zhodné. Na základe týchto meraní bol vytvorený model, ktorý nahrádza experimentálne merania pre uhly do 50° , ktoré sa v experimentálnych podmienkach vytvárajú veľmi ťažko. Pre väčšie uhly bola hodnota maximálneho zaťaženia takmer konštantná. Všetky výskumy potvrdzujú, že výsledné vlastnosti kompozitného sendviča ovplyvňuje množstvo faktorov, ktoré je možné čiastočne numericky nasimulovať a predísť tak istým druhom poškodenia už pri tvorbe koncepcie materiálu. (Ivanez a kol., 2015)

Numerická metóda výskumu sa stala čoraz atraktívnejšou vďaka jej výhodám pri minimalizácii rozsahu testovania, čím sa šetria náklady na návrh a čas. Uvádza sa, že pri testovaní kompozitných sendvičových štruktúr na nárazy v nízkej rýchlosti musia byť brané do úvahy aj dynamické vlastnosti materiálov. Mnoho numerických modelov však doposiaľ ignorovalo vplyv rýchlosti deformácie na materiálové vlastnosti povrchových vrstiev alebo jadra. Zároveň je potrebné v experimentoch presne predpovedať reakciu na náraz a poškodenie sendvičovej štruktúry, aby bolo možné stanoviť hlavné režimy porúch v numerickom modeli. Len málo štúdií však spája svoje numerické modely s mikroskopickými experimentálnymi pozorovaniami poškodení kompozitných sendvičových štruktúr po náraze.

Dalo by sa preto konštatovať, že ideálnym predikčným mechanizmom pre určovanie výsledných vlastností sendvičových kompozitov je vyvinúť systematický numerický model, ktorý dokáže riešiť režimy porúch a následne predpovedať poškodenie kompozitných sendvičových štruktúr. Tvorba takéhoto modelu však vyžaduje systematické čiastkové porovnávanie výsledkov experimentov s numerickým modelom tak, aby bolo možné predpovedať správanie kompozitného sendvičového panelu počas nárazu.

Pre vykonávanie simulácií a numerických modelov je možné využiť niekoľko programov. Pre výskum v rozsahu tohto príspevku je však limitujúcim faktorom najmä ekonomický aspekt a teda cena a dostupnosť programov pre užívateľa.

Prvým programom braným do úvahy je ANSYS. Program ANSYS je vo všeobecnosti nelineárny, multifyzikálny program, ktorý umožňuje štrukturálne a termodynamické analýzy, analýzy prúdenia kontinua, analýzy elektrostatických polí a tiež akustické analýzy. Všetky tieto analýzy je možné vykonávať jednotlivo alebo súčasne. Tento program je využívaný v rôznych priemyselných odvetviach strojárstva, ako sú automobilová a mobilná technika, energetika, stavebné inžinierstvo a tiež nachádza široké uplatnenie aj vo vojenských aplikáciách. Je možné modelovať široké spektrum kompozitov od jednotlivých vlákien až po zložité sendvičové štruktúry v kombinácií s rôznymi materiálmi. V systéme sa nachádzajú predvolené materiály, prípadne je možné materiál nadefinovať od začiatku. Vzhľadom na ekonomickú náročnosť je však tento program ťažko dostupný pre individuálny výskum.

Ďalším programom, ktorý je najmä pre bežných užívateľov na trhu ľahšie dostupným v porovnaní s predošlým, je program LS DYNA. LS DYNA je konečno prvkový program schopný simulovať zložité úlohy v reálnych podmienkach. Program je rozšírený v kozmickom, leteckom, automobilovom a vojenskom priemysle, ale aj stavebníctve alebo inžinierstve.

V programe je možné modelovanie rýchlych dynamických javov ako sú výbuchy, nárazy prípadne deformácie. Cieľom takýchto modelácií je získanie popisu vývoja tlakovej vlny a priebehu zaťaženia na rozhraní vzorka-výbušnina a tiež vplyv zaťaženia na vzorku.

Ako už bolo v úvode spomenuté, veľká časť zaťaženia, ktorému musí pancierovanie vozidla odolávať je spôsobené delostreleckou muníciou. Pri veľkom množstve simulácií je však pre zjednodušenie modelu namiesto munície použité ekvivalentné zaťaženie.

Štúdiá z roku 2016 zameraná na numerické overenie experimentu zaťaženia kompozitného panelu kontaktným výbuchom v programe LS-DYNA poukazuje na porovnanie výsledkov experimentálnych skúšok a numerického modelovania experimentu s využitím programu LS-DYNA. Zároveň poukazuje na viacero prístupov k numerickým modelom. (Janota, 2016)

Prvým z modelov je metóda LOAD BLAST ENHANCED. V tejto metóde dochádza k nahradeniu výbušniny zaťažením pôsobiacim na kontaktnú plochu kompozitného panelu. Hmotnostný ekvivalent výbušniny je zadávaný pomocou príkazu „LOAD BLAST ENHANCED“. Na povrchovej (kontaktnej) časti vzorky je viditeľné poškodenie, ktoré sa prejavuje vytvorením krátera v dôsledku tlakovej vlny a radiálnym výskytom trhlín v jeho okolí. Metóda je v porovnaní s ďalšími metódami pomerne jednoduchá na výpočet, avšak jej výsledky vykazujú značné odchýlky od experimentálnych výsledkov. (Janota, 2016)

Nasledujúcou metódou, ktorú je možné využiť pre kontaktný výbuch je metóda „SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS“. Pri tejto metóde je výbušnina modelovaná pomocou častíc, ktoré sú viazané stavovou rovnicou. Zároveň je stanovená hustota výbušniny a počiatkový bod detonácie. Zaťaženie z výbuchu je do kompozitného panelu prenesené

interakciou fragmentov výbušniny do panelu. Rovnako ako pri predošlom modeli, nie je nutné modelovanie vlastností okolitého prostredia v ktorom sa šíri tlaková vlna z výbuchu. Nevýhodou tejto metódy je citlivosť na počet častíc v určitom objeme priestoru a problém s prenikaním fragmentov do panelu bez následnej interakcie. Pri veľkej hustote častíc dochádza k zlyhaniu výpočtu. Výsledky tejto metódy v porovnaní s predošlou metódou zobrazujú väčšiu plne splastizovanú povrchovú časť vzorky. Spodná strana vzorky je splastizovaná na približne 30 %. V jadre kompozitného panelu vzniká plne splastizovaná plocha okolo ktorej sa šíria radiálne trhliny do všetkých smerov. Takýto výsledkov modelovania sa najlepšie zhoduje s výsledkami experimentálnej časti výskumu autora. (Janota, 2016)

Poslednou metódou, ktorá je však výpočtovo najnáročnejšia je „ARBITRARY LAGRANGIAN-EULERIAN“ metóda. Metóda využíva simuláciu kompozitného panelu a tiež okolitého prostredia, v ktorom sa šíri tlaková vlna spôsobená výbuchom. Pri dostatočne nastavenom rozlíšení mriežky vzorky nad 10 mm, ktoré je schopná výpočtová technika obsiahnuť kapacitou pamäte sú výsledky značne skreslené. Na kontaktnom povrchu dochádza k vytvoreniu plne splastizovaného kruhu, z ktorého sa šíria radiálne menšie a kratšie trhliny. Odvrátená strana vzorky je na povrchu splastizovaná na 95 % a nie je možné sledovať vznik a šírenie trhlín. (Janota, 2016)

2.1 Experimentálny postup simulácie v programe LS-DYNA

Na základe výsledkov spomenutých výskumov je dôležité jednotlivé výsledky experimentov a numerického výpočtu vzájomne porovnávať. Pre potreby nášho výskumu je potrebné stanoviť vhodnú výpočtovú metódu v programe LS-DYNA. Cieľom je vytvorenie vhodného modelu simulácie kontaktného výbuchu, jeho pôsobenia na materiál a priebehu poškodenia v zvolenom dostupnom druhu materiálu. Metódou, ktorú sme použili pri simulácií v programe LS-DYNA je kombinácia metódy LOAD BLAST ENHANCED doplnená o prvky druhého spomínaného modelu s využitím stanovenia počiatočného bodu detonácie a stanovenia vlastností okolitého prostredia. Pre zjednodušenie však nie je do modelu zakomponovaná možnosť fragmentácie častíc výbušniny. Šírenie fragmentov v priestore a ich interakcia s materiálom vzorky totiž predstavuje problém pri kapacite výpočtu. Pre počiatočný výskum tejto práce bol zvolený materiál pod obchodným názvom AIREX C 70.90 od českého predajcu kompozitných materiálov – Havel Composites.

Spoločnosť sa zaoberá spracovaním a predajom materiálov pre prevažne komerčné účely ako je letecký, lodný a automobilový priemysel. Samotný materiál AIREX C 70.90 je polyvinyl-chloridová (PVC) pena, ktorá je v civilnom sektore bežne používaným materiálom pre jadrá sendvičových konštrukcií. Vyznačuje sa dobrými statickými aj dynamickými vlastnosťami a vysokou odolnosťou voči absorpcii vody. Rozsah prevádzkových teplôt je od -240 °C do +80 °C a pena je tiež odolná voči rôznym druhom chemikálií. V civilnom sektore sa využíva najmä v lodnom priemysle, ako materiál pre trupy, paluby a interiéry, ďalej v automobilovom priemysle pre výrobu strešných panelov, interiérov a pod. Uplatnenie

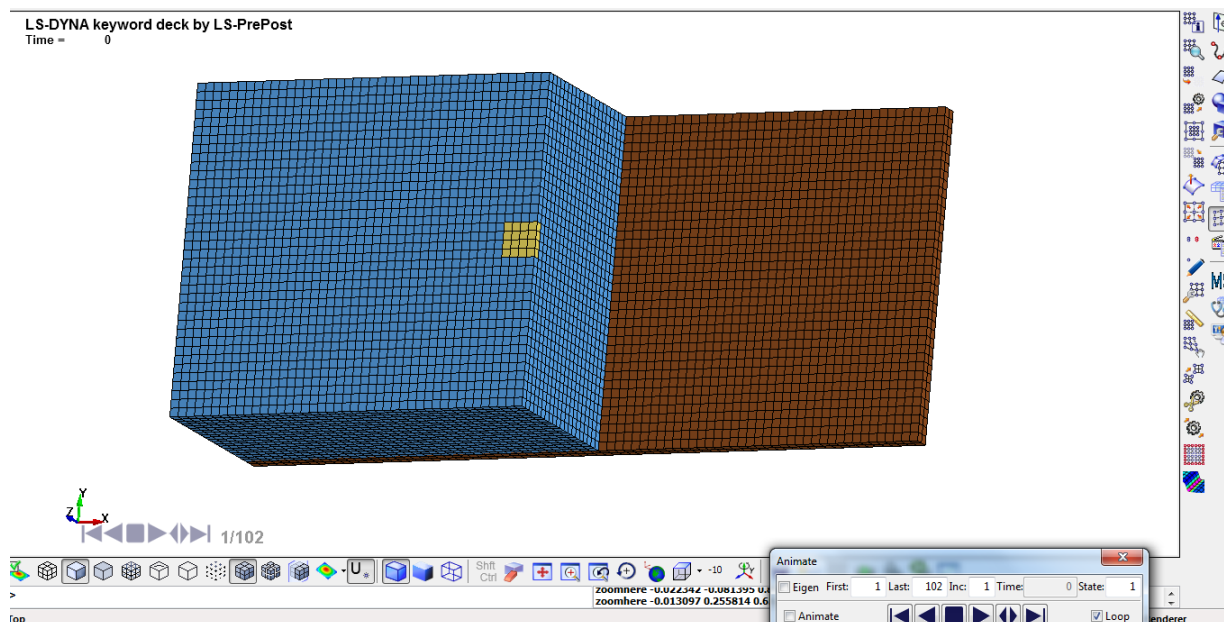
nachádza aj v energetike pri výrobe listov veterných turbín alebo generátorov. Najrozšírenejšie použitie však zaznamenávame v leteckom priemysle pre časti ľahkých športových lietadiel. Materiál AIREX C 70.90 v spojení so sklenou, uhlíkovou alebo inou tkaninou s vytvrdenou živicom vykazuje vysokú tuhosť pri relatívne nízkej hmotnosti. Materiál bol zvolený z dôvodu dobrej porovnateľnosti výsledkov pri použití sendvičových kompozitov na báze jadra z hliníkovej peny.

Tabuľka 1 Vstupné špecifikácie materiálu AIREX C 70.90

Vstupný parameter	hodnota	Jednotka
Objemová hmotnosť	100	kg/m ³
Pevnosť v tlaku	1,9	N/mm ²
E-Modul v tlaku	110	N/mm ²
Pevnosť v ťahu	2,7	N/mm ²
E-Modul v ťahu	81	N/mm ²
Šmyková pevnosť	1,6	N/mm ²
Modul v šmyku	38	N/mm ²
Pomerné predĺženie	33	%
Tepelná vodivosť	0,035	W/mK

Zdroj: (Havel Composites,2021)

Prvým krokom bolo vytvorenie modelu vzorky PVC sendvičového materiálu (hnedá farba) pre výpočet s rozmermi 2050x950x25 mm, v ktorých sa materiál štandardne vyrába (Obrázok 2). Ako vstupné parametre boli použité údaje výrobcu prezentované v Tabuľke 1.



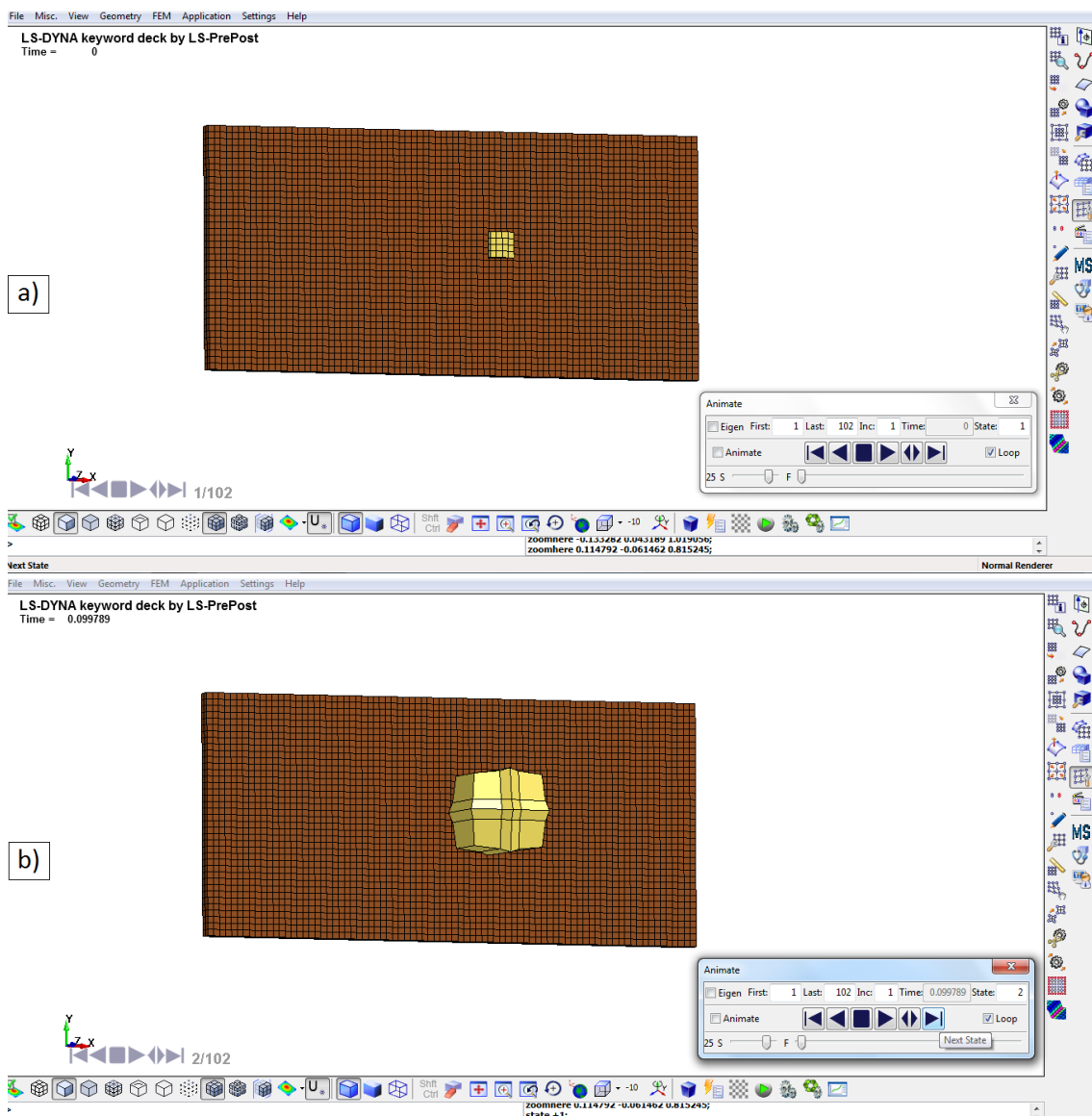
Obrázok 2 Zobrazenie jednotlivých prvkov simulácie

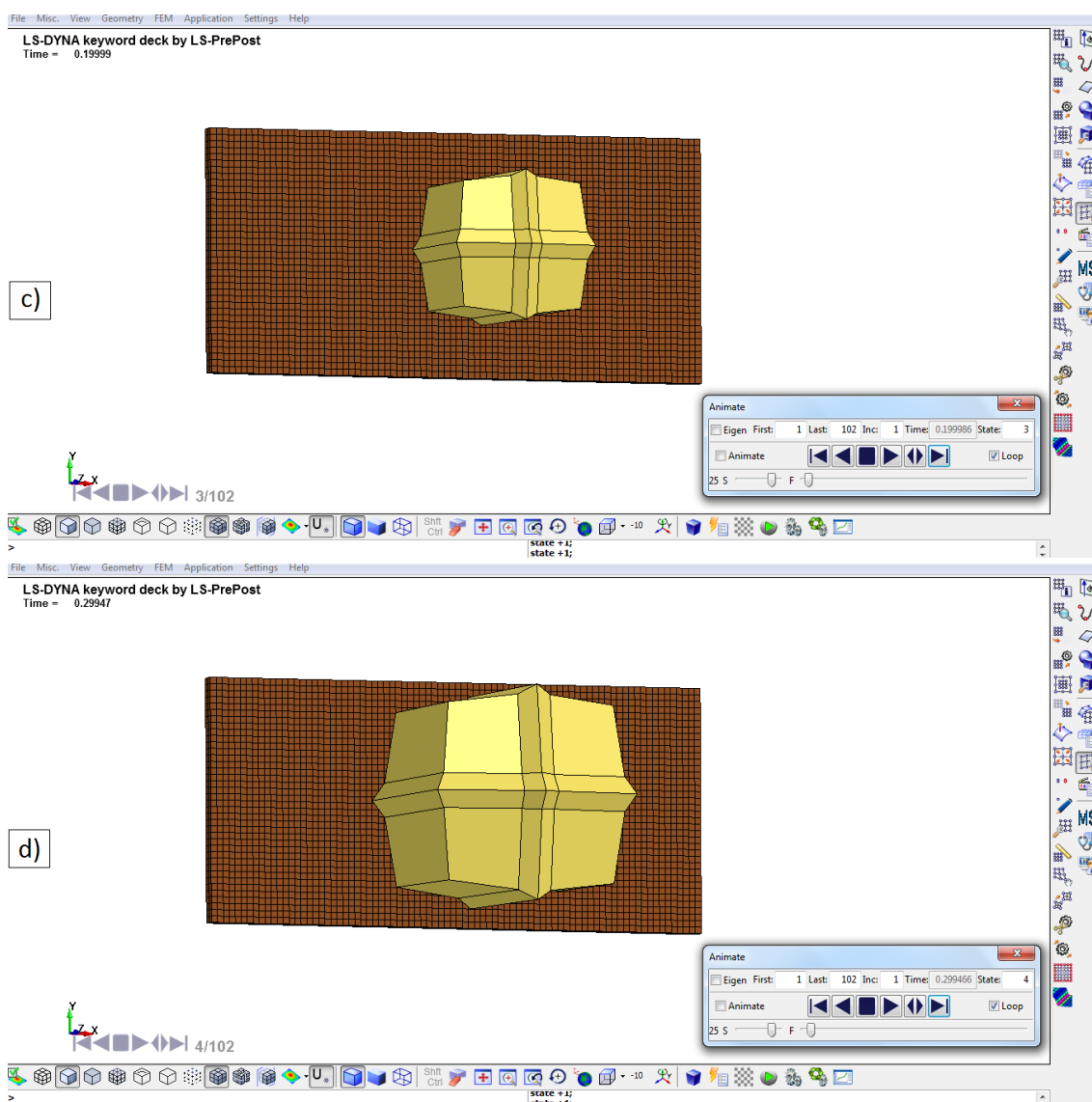
Zdroj: vlastné spracovanie v programe LS-DYNA

Zadnú plochu plátu sme ukotvili vo všetkých bodoch tak, aby sme dosiahli efekt upevnenia materiálu na pevnom podklade. Pre tento výpočet sme zvolili pre jednotlivé

elementy tvar kocky s dĺžkou hrany 25 mm pri všetkých troch prvkoch modelu (PVC pena, vzduch, TNT). Ďalším prvkom nášho modelu je vzorka výbušniny TNT s rozmermi 100x100x25 mm (žltá farba), ktorej ekvivalentom je výbuch o sile 1,62 MJ. Tretím, dôležitým prvkom je prostredie medzi vzorkou výbušniny a vzorkou PVC peny (modrá farba). Pri simulácii dochádza ku prenosu výbuchu prostredím, čo znamená, že týmto prostredím sa šíri aj tlaková vlna výbuchu. Zvolené prostredie sme definovali pomocou parametrov ako vzduch so štandardnou hustotou $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Po vytvorení jednoduchého modelu bolo potrebné zdefinovať parametre pre výpočet - fyzikálne vlastnosti oboch použitých materiálov, ako aj časový rozsah priebehu výbuchu. Priebeh výbuchu TNT po spustení simulácie zobrazuje obrázok 3. Pre lepšie znázornenie nie je prostredie definované ako vzduch na obrázku viditeľné. Priebeh výbuchu vzorky TNT sa prejavuje rozpínaním vzorky TNT. Vzorka TNT simuluje zvyšujúci sa tlak a hodnoty ekvivalentné výbuchu avšak nespôsobuje fragmentáciu častíc do priestoru.

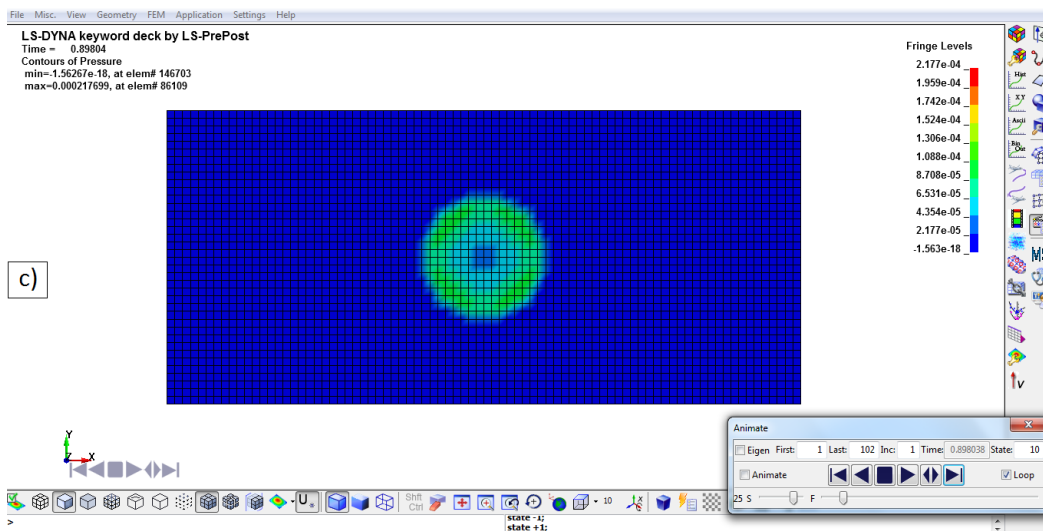
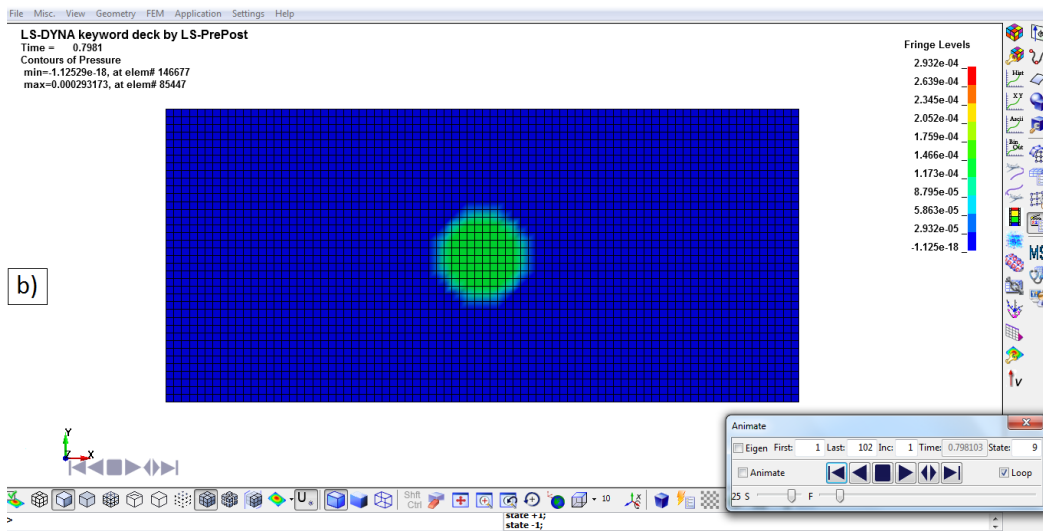
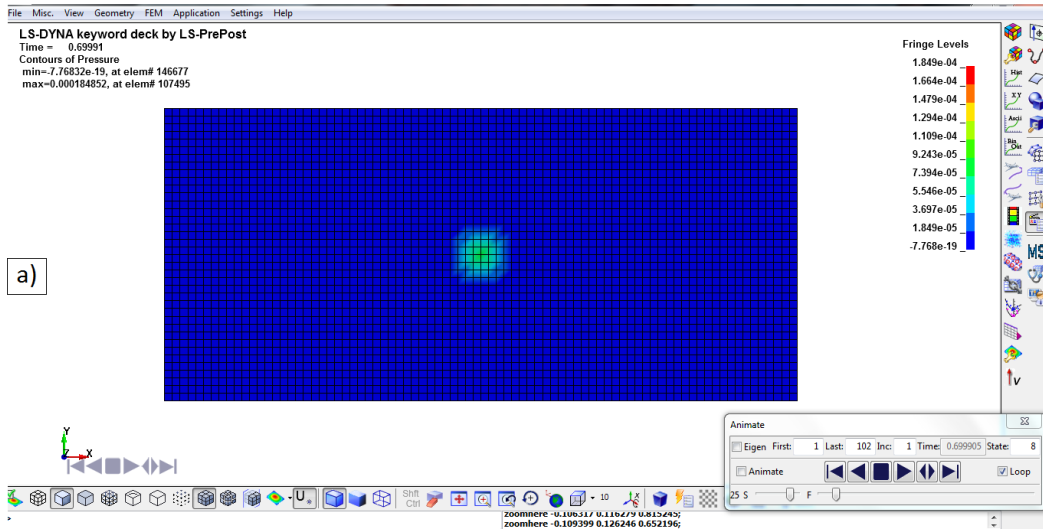


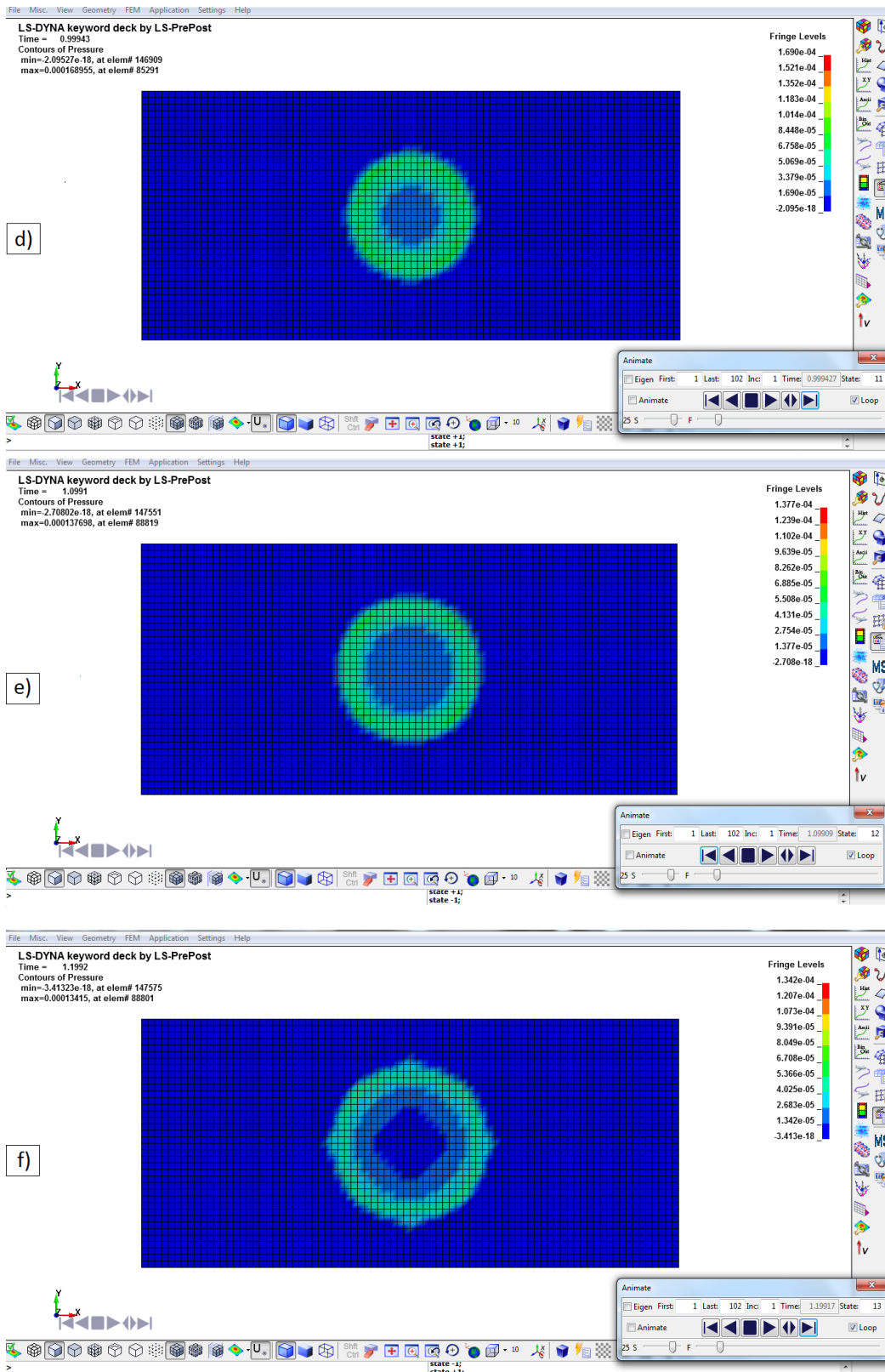


Obrázok 3 Zobrazenie priebehu výbuchu vzorky TNT v jednotlivých časových úsekoch od iniciácie výbuchu a) počiatkový stav pred iniciáciou, b) čas = 0,099789 sekundy, c) čas = 0,199986 sekundy, d) čas = 0,299466 sekundy

Zdroj: vlastné spracovanie v programe LS-DYNA

Výbuch vyvoláva na povrchu vzorky kompozitu tlakovú vlnu, ktorá sa v simuláciách prejavuje pôsobením vlny na povrchu na kontaktnej strane vzorky. (Obrázok 4) Na rozdiel od simulačných modelov spomenutých v práci (Janota, 2016) v nami vytvorenej simulácii absentuje znázornenie splastizovania povrchu čo bráni skúmaniu správania materiálu po pôsobení výbuchu. Na odvrátenej strane vzorky nie je pozorovateľný výsledok výbuchu ani prípadné poškodenie. Tento efekt je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobený absenciou dynamických vlastností materiálu a tiež spôsobu deformácie materiálu. Tie je však potrebné skúmať empiricky pri ekvivalentom výbuchu a výsledky tohto výskumu zakomponovať do vytvoreného modelu.





Obrázok 4 Zobrazenie priebehu výbuchu vzorky TNT na povrchu vzorky v jednotlivých časových úsekoch od iniciácie výbuchu a) čas = 0,699905 sekundy, b) čas = 0,798103 sekundy, c) čas = 0,898038 sekundy, d) čas = 0,999427 sekundy, e) čas = 1,09909 sekundy, f) čas = 1,19917 sekundy

Zdroj: vlastné spracovanie v programe LS-DYNA

ZÁVER

Výskum materiálu pre kompozitné sendviče je komplexný postup, ktorý si vyžaduje systematické partikulárne porovnávanie výsledkov experimentálnych štúdií a numerických výpočtov. Výsledkom príspevku je stručný popis modelu vplyvu zaťaženia spôsobeného výbuchom na zvolenú vzorku polyvinyl-chloridovej peny používanej v kompozitných sendvičoch. Spomínané riešenie poskytuje iba čiastočné výsledky zobrazujúce priebeh tlakovej vlny, čo znamená, že materiál TNT vyvoláva na vzorku kompozitného materiálu AIREX C 70.90 zaťaženie pri výbuchu. Pôsobenie výbuchu vo vnútri vzorky a na odvrátenej strane povrchu vzorky absentuje z dôvodu, že zadaný kompozitný materiál neprenáša účinky výbuchu po celom svojom objeme, len na povrchu vzorky.

Riešením vzniknutého problému je ďalší simulačný postup, ktorý vyžaduje porovnávanie výsledkov simulácie s výsledkami experimentálneho výbuchu. Pozorovanie experimentálneho výsledku by napomohlo doplniť chýbajúce vstupné parametre a poskytnúť tak reálnejší výsledok deformácie vzorky kompozitného materiálu po výbuchu. Vytvorený simulačný model približuje postup simulácie a režim poškodenia na povrchu vzorky. Program LS-DYNA zobrazuje vplyv zaťaženia na vzorku počas priebehu výbuchu, neposkytuje však parametre pôsobenia výbuchu vo vnútri vzorky. Chýbajúce výsledné zaťaženie vo vnútri vzorky je spôsobené absenciou dynamických vlastností materiálu a tiež zadaním spôsobu deformácie materiálu.

Čím väčšie je množstvo vstupných parametrov a ich presnosť, tým náročnejší je proces výpočtu simulácie. Modelovanie elementov materiálov vzorky kompozitu, výbušniny a zároveň prostredia, v ktorom sa výbuch šíri je možné zvoliť ľubovoľne. Väčší počet elementov ponúka vyššiu presnosť výpočtu avšak zvyšuje tým jeho náročnosť. Riešením je zníženie nárokov na využitú pamäť počítača za účelom zaistenia stability výpočtu. Znižovanie využitej kapacity však vedie k zníženiu presnosti výsledku. Príspevok preto poskytuje iba stručný náhľad do problematiky, ktorú je potrebné ďalej rozvíjať. Výsledky príspevku je možné použiť pre ďalší výskum v oblasti numerického modelovania a výskumu sendvičových kompozitných materiálov.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- ANDERSON T., MADENCI E. Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Composite Structures*, roč. 2000, č. 50, s. 239–47. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00098-2)
- HAVEL COMPOSITES. 2021. Technický list Airex C70. [online] [cit. 2021-04-20]. Dostupné na internete:

<https://www.havelcomposites.com/uploads/files/products/1030/640aec8a6f3ccb93d8c2bd39f2c32a10d58d1a4b.2011.pdf>

HAZIZAN MA., CANTWELL WJ. The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure. *Compos Part A Appl Eng*, roč. 2003, č. 34, s. 679–687.

[https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00089-1)

HEIMBS S., SCHEEMER S., MIDDENDORF P, MAIER M. Strain rate effects in phenolic composites and phenolic-impregnated honeycomb structures. *Composite Science Technology* 2007, 67, s. 2827–2837. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.01.027>

HOU JP., RUIZ C. Measurement of the properties of woven CFRP T300/914 at different strain rates. *Composite Science Technology*, roč. 2000, č. 60, s. 2829–2834.

[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00151-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00151-2)

IVANEZ I., MOURE MM., GARCIA-CASTILLO SK., SANCHEZ-SAEZ S. The oblique impact response of composite sandwich plates. *Composite Structures*, roč. 2015, č. 133, s. 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.035>

JANOŤA, O. Numerické ověření experimentu zatížení kompozitního panelu kontaktním výbuchem v program LS-DYNA. In: PhD. Workshop 2017. [online] Praha. Dostupné na internete:

https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81675/Janota__Numerical_Evaluation_of_Contact_Blast_Experiment_Using_LSDyna__%282017%29_PUBV_314168.pdf?sequence=1&isAllowed=y

JING, L. a kol. Dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores under blast loading—Numerical simulations. China: Taiyuan University of Technology, 2013. *Composite Structures*, roč. 2013, č. 99, s.213-223.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.013>

TIMÁROVÁ, Ľ. 2016. Lightweight armor and its use on the battlefield. Trenčín: Univerzita Alexandra Dubčeka, *University Review*, roč. 10, č. 4, s. 27-31

npor. Ing. Alexandra BAKIČ

Externá doktorandka katedry strojárstva
Akadémia ozbrojených síl gen. M. R. Štefánika,
Demänová 393, 031 01 Liptovský Mikuláš,
Telefón: 0918 431 161
e-mail: alexandraferova@gmail.com