

# **BEZPEČNOST ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ VŮČI EXTRÉMNÍM KLIMATICKÝM JEVŮM – EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA POŠKOZENÍ NÁRAZEM LETÍCÍCH TĚLES**

## **POWER PLANT SAFETY VIS-A-VIS THE EXTREME CLIMATIC EVENTS – EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE DAMAGE DUE TO THE FLYING BODIES IMPACT**

Jan Raška a Radek Doubrava

Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Beranových 130, 199 05 Praha – Letňany,  
e-mail: raska@vzlu.cz, tel.: +420 225 115 45

### **Abstrakt**

Součástí bezpečnosti energetických zařízení, jako objektů kritické infrastruktury, je ochrana proti nárazu letících těles. Tato tělesa – části stromů, stavebních konstrukcí nebo letadel – mohou být vymrštna buď v důsledku extrémních klimatických jevů (vichřice, tornádo, ...), nebo vlivem lidské činnosti (průmyslové havárie, výbuchy, pády letadel, ...).

V příspěvku jsou prezentovány experimenty nárazu těles vystřelených pneumickým dělem a snímaných vysokorychlostní kamerou. Tyto reálné experimenty jsou porovnány s experimenty virtuálními, kdy náraz těles (vysokorychlostní impakt) je simulován explicitní metodou konečných prvků. Konkrétně je prezentován náraz betonového tělesa do kompozitové konstrukce a impakty kroupou.

### **Abstract**

The protection against the flying bodies is a part of the safety of the power plant, in terms of critical infrastructure object. This bodies – tree parts, engineering constructions, aircraft – can be shoot out due to extreme climatic events (windstorm, tornado, ...) or due to human activity (industrial disasters, explosions, aircraft crashes, ...).

This paper deals with experiments of impact bodies, catapult by the pneumatic cannon end recorded by the high-speed camera. These real experiments are compared with the virtual ones, the high-speed impact is simulated by the explicit finite element method. Concretely, the concrete body impact into the composite structure and the hail-strikes are examined.

### **Úvod**

V důsledku extrémních klimatických jevů, nebo lidské činnosti, mohou být energetická zařízení zasažena rozměrnými objekty se značnou kinetickou energií. Analýzu účinku impaktu těchto letících těles je možné provádět numerickou simulací, vzhledem k rozměrům objektů (části stromů, trosky stavebních konstrukcí nebo letadel) je experiment v plném měřítku většinou prakticky vyloučen.

Impakt je rychlým dynamickým dějem, který je vhodný řešit implicitní metodou konečných prvků. Pro prezentované výsledky byl použit software ABAQUS EXPLICIT.

Aby byla simulace realistická, je nutné aplikovat komplexní materiálové modely, zejména pak modely iniciace a růstu poškození. Podmínkou průkaznosti takové numerické analýzy (její shody s fyzikální realitou) je její experimentální validace v redukovaném měřítku. Pro tyto experimenty bylo ve společnosti VZLÚ použito pneumické dělo, primárně sloužící pro průkaz odolnosti letecké konstrukce při střetu s ptákem.

V tomto příspěvku je prezentován náraz betonové krychle, simulující trosky stavební konstrukce, do kompozitového materiálu a příklady impaktu kroupou.

## Impakt kompozitové lopatky betonovým tělesem

Příkladem, kdy bylo nutné prokázat odolnost konstrukce energetického zařízení vůči nárazu letících těles, je kompozitová lopatka ventilátoru záložní chladicí věže elektrárny. V případě extrémního (tisíciletého) větru existuje riziko zborcení betonové konstrukce primárních chladících věží. Za těchto okolností přebírají jejich funkci záložní chladicí věže s nucenou ventilací. Existuje ovšem nebezpečí, že trosky betonové konstrukce zasáhnou a poškodí lopatky ventilátoru záložní chladicí věže. Za tímto účelem byl ventilátor chráněn ocelovou sítí. Nicméně, bylo nutno prokázat, že úlomky betonu do velikosti ok sítě neohrozí funkci ventilátoru.

Průkaz odolnosti konstrukce vůči nárazu betonových trosek byl proveden pro celou obálku rychlostí, úhlů dopadu a míst impaktu numericky, implicitní metodou konečných prvků, softwarem ABAQUS EXPLICIT. Nicméně tyto numerické simulace byly validovány experimentálně, reálným impaktem kompozitové konstrukce betonovým tělesem [1].



Obr. 1: Pneumatická děla VZLÚ s průměrem hlavní 125 mm (nahore) a 260 mm (dole)

Pneumatickým dělem (obr. 1) byla vystřelena betonová tělesa do kompozitové lopatky, instalované před ústí hlavní, jak je dokumentováno na obr. 2.



Obr. 2: Realizace zkoušky impakt betonovým tělesem

Betonová krychle o rozměrech 80 x 80 x 80 mm byla umístěna do velmi lehkého polystyrenového obalu, který slouží zároveň k utěsnění hlavě – viz obr. 3.



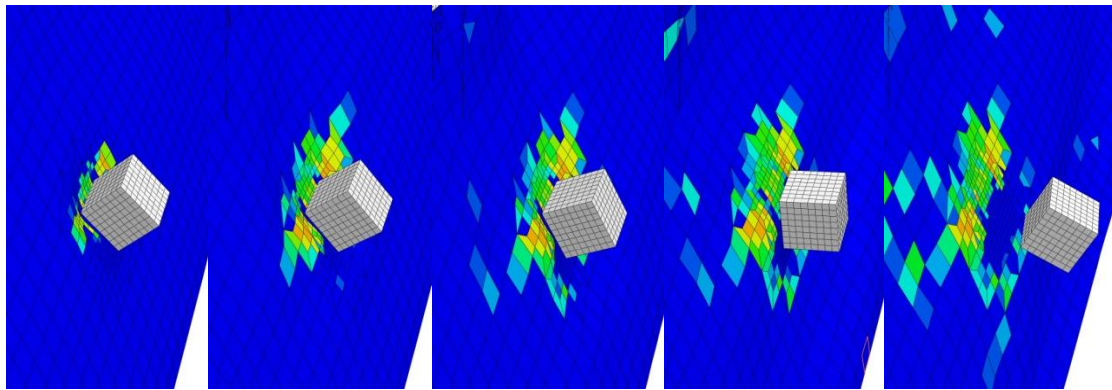
Obr. 3: Projektil: betonové těleso před a po experimentu (první impakt)

Byly realizovány dva impakty. První výstřel byl veden do osy nosníku lopatky rychlostí 194 km/h. Na sledu snímků z rychloběžné kamery (obr. 4) je dobře patrná dynamika nárazu tělesa do konstrukce, dynamické deformace kompozitního materiálu a odraz tělesa zpět. Při impaktu došlo k rozlomení polystyrenového obalu, betonové těleso ovšem zůstalo prakticky neporušené, jak je vidět na obr. 3. K poškození nedošlo ani u kompozitové konstrukce.

Tentýž děj, numericky simulovaný, je zobrazen na sledu snímků na obr. 5. Barevná škála indikuje míru zatížení kompozitního materiálu. Zobrazené hodnoty jsou relativně nízké, v žádném místě nedochází k destrukci materiálu, což je v souladu s experimentem. Stejně jako v reálném případě se betonové těleso odráží od kompozitové konstrukce.

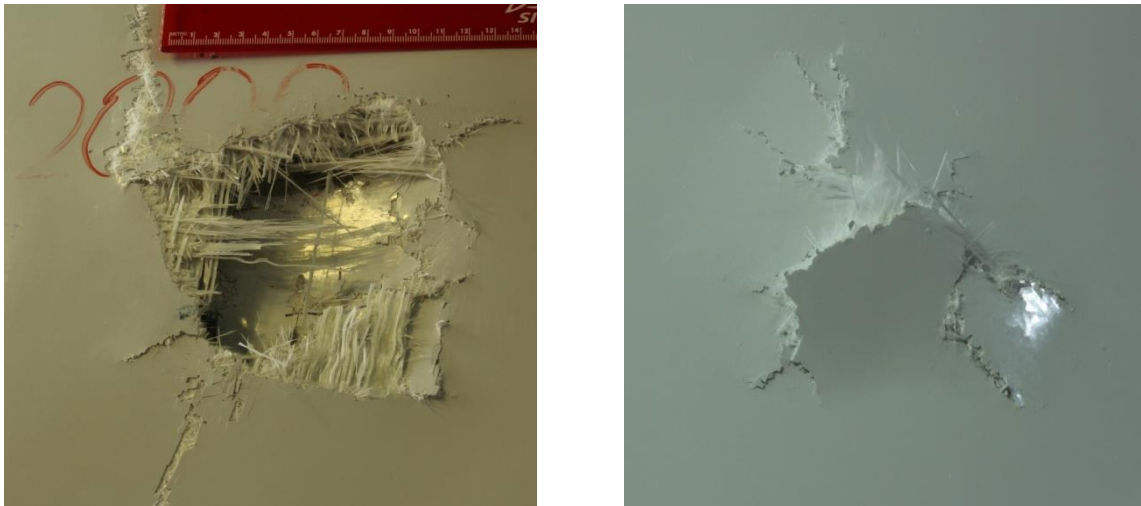


Obr. 4: Sled záběrů rychloběžné kamery – první impakt



Obr. 5: Sled záběrů numerické simulace – první impakt

Druhý impakt byl veden mimo osu nosníku lopatky rychlostí 337 km/h. Zde došlo v trajektorii impaktu k totální destrukci přední i zadní stěny lopatky (viz obr. 6), nicméně tato destrukce spotřebovala veškerou kinetickou energii, betonové těleso se zastavilo uvízlo v dutině lopatky.



Obr. 6: Poškození přední (vlevo) a zadní stěny (vpravo) – druhý impakt

Tento děj se podařilo prakticky shodně numericky nasimulovat, což dobře validuje zejména model porušení kompozitového materiálu a použité materiálové charakteristiky.

## Impakt kroupou

Velmi aktuální je nebezpečí poškození fotovoltaických elektráren dopadem krup. Tato energetická zařízení jsou relativně málo odolná vůči extrémním klimatickým jevům, jako jsou vichřice, tornáda a krupobití, které mohou způsobit vysoké ekonomické škody. Z těchto rizik má právě dopad velkých krup nejničivější účinek.

VZLÚ se analýze vysokorychlostních impaktů kroupou věnuje experimentálně od 70. let, numericky poslední desetiletí. I když se převážně řešily letecké aplikace, fyzikální podstata problému je stejná, jako v případě impaktu fotovoltaických panelů.

Standardní zkoušky se provádějí s kroupami o průměru 25 a 50 mm, vložené do polystyrenového pouzdra, viz obr. 7. Pouzdro je v tomto případě zastaveno úst'ovou brzdou a do kontaktu se zkušebním tělesem se dostane pouze kroupa.

Pro numerickou simulaci explicitní variantou metody konečných prvků je nutné vytvořit model kroupy jak klasickými prvky, tak prvky SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) – obojí na obr. 7. Zásadní pro věrohodnost simulace jsou parametry modelu poškození, dezintegrace kroupy.

Jak je patrné z obr. 8 a obr. 9, existuje velmi dobrá shoda mezi experimentem a numerickou simulací jak pro kolmý, tak pro šikmý impakt.



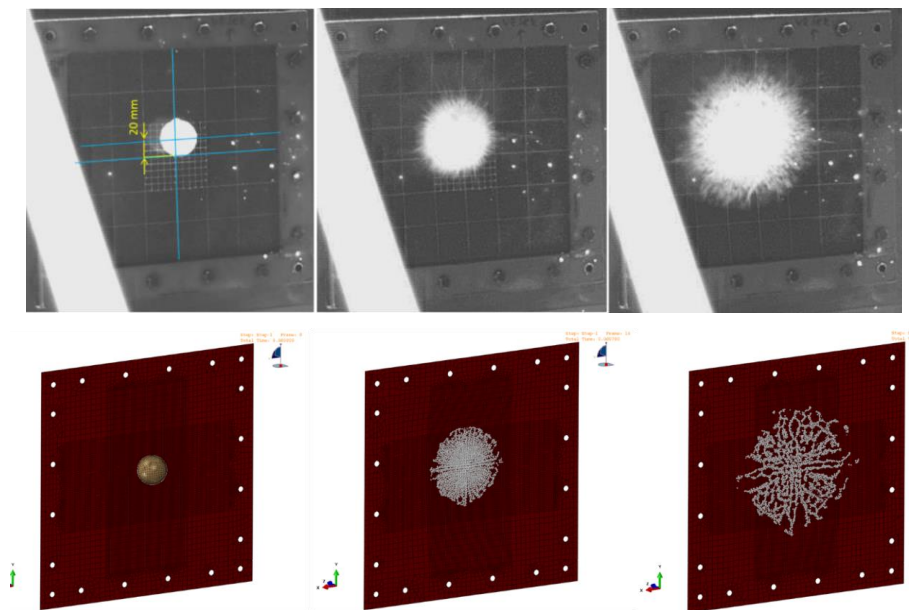
Obr. 7: Kroupa, její umístění v pouzdru, model MKP, model SHP elementy

## Závěr

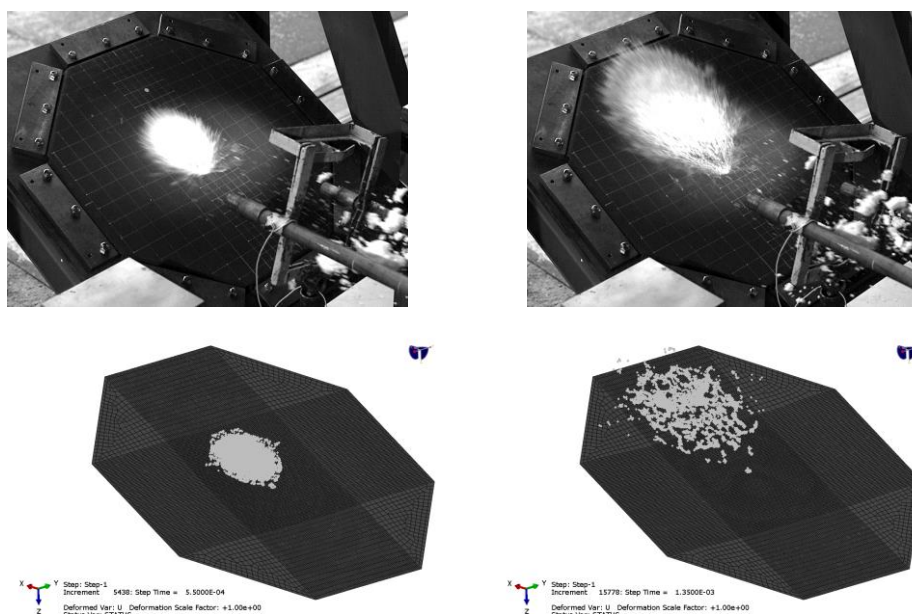
Prezentované příklady experimentální a numerické analýzy vysokorychlostního nárazu těles tvoří pouze malý výsek z problematiky bezpečnosti energetických zařízení vůči extrémním klimatickým jevům. Ukazují nicméně na možnosti řešit tyto problémy numerickými simulacemi implicitní variantou metody konečných prvků.

Tento přístup ovšem vyžaduje použití komplexních modelů a metod – zejména modelů poškození materiálu – které je ovšem nutné experimentálně validovat. Prezentovanou variantou jsou zkoušky vysokorychlostním impaktem pomocí pneumatického děla.

Dlouhodobé zkušenosti s těmito zkouškami a využití získaných dat umožnilo zlepšit nastavení parametrů příslušných numerických modelů a dosahovat velmi dobré shody simulací s experimentem.



Obr. 8: Kolmý impakt: porovnání experimentu (nahore) s numerickou simulací (dole)



Obr. 9: Šikmý impakt: porovnání experimentu (nahore) s numerickou simulací (dole)

## Literatura

- [1] Strnad, V. (2013): Zkouška nárazu zkušební tělesa simulujícího nádrž s leteckým palivem na pevnou překážku. Zkušební protokol, Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Praha.
- [2] Doubrava, R., Oberthor, M., Bělský, P., Vích, O. (2019): An Improvement of measurement technique for high speed impact tests analysis. Proceedings of 57th International Conference Experimental Stress Analysis, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Luhačovice, CD-ROM. ISBN 978-80-214-5753-9
- [3] Doubrava, R. (2013): *SPH Technique Application for Fast Impact Simulation*. Report, VZLU R-5841, Výzkumný a zkušební letecký ústav, a. s., Praha. Available on: <http://www.vzlu.cz/en/certified-methodology-n-met-c488.html>