

EFEKT VÍCENÁSOBNÉHO DOPADU VODNÍCH KAPEK NA INTEGRITU CFRP KOMPOZITU

Jakub Poloprudský*, Alice Chlupová, Akash Nag, Sergej Hloch

Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., Žitkova 22, Brno
Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 9, Ostrava-Poruba

Abstrakt (10pt)

Práce se zabývá erozí vícenásobným dopadem kapek na povrch polymerního kompozitu vyztuženého uhlíkovými vlákny (CFRP). Pro studium byla použita inovativní technologie pulzujícího vodního svazku (PWJ), kdy dochází k rozpadu kontinuálního vodního svazku na diskrétní shluky kapek. Pro analýzu vývoje eroze v čase byla použita zvyšující se doba expozice. Hydraulické parametry byly následující: tlak 20 MPa, tento tlak vede k vytvoření proudu o rychlosti 184 m/s, při průměru trysky 0.2 mm. Erozní expozice se zvyšovala od 2 sekund do 15 sekund s krokem 1 sekunda. Vytvořené kapky dopadaly na povrch s frekvencí 40kHz. Hloubka erozních kráterů byla vyhodnocena pomocí konfokálního mikroskopu a mechanismus eroze byl pozorován pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Cílem práce bylo provést předběžný výzkum zabývající se erozním vývojem a určováním erozní odolnosti kompozitu s uhlíkovými vlákny.

1. Úvod

Eroze způsobená vodními kapkami periodicky dopadajícími na povrch kovových materiálů je známá již z tradičních energetických zdrojů (lopatky parních turbín). Vzhledem k současné energetické situaci a k rostoucímu tlaku na využívání obnovitelných zdrojů roste počet větrných elektráren jak pevninských, tak mořských, kde problematika eroze nabývá na významnosti. Z hlediska kompozitů s polymerní matricí se jedná o poškození náběžných hran lopatek větrných elektráren. S tím, jak s rostoucími nároky na efektivitu roste délka lopatek a dosažitelná rychlost otáček (zejména na moři, kde nezáleží na hlučnosti provozu), ovšem výrazně roste i rychlost dopadajících kapek. To vede ke zrychlené erozi náběžových hran lopatek, kde změna tvaru vede ke snižování účinnosti větrné elektrárny [1]. Obdobou erozního působení vody je eroze vzniklá působením dopadu tuhých částic obsažených v atmosféře. Studium tohoto jevu například v pouštním prostředí, se zabývali např. Kim [2] či Demirci [3]. Zkoumáním eroze vyvolané kombinovaným působením vody a tuhými částicemi se zabývají zejména technologové používající abrazivní vodní paprsek (AWJ) k řezání různých materiálů včetně kompozitů [4,5].

Verma a spol. [6] modeloval rychlost kapek v závislosti rychlosti lopatek při různých intenzitách deště. Intenzitu deště rozdělil na 4 stupně od lehkého deště, přes průměrný a silný dešť, až po velmi silný dešť s rozpětím rychlostí dešťových kapek od 4,93 m/s přes 6,35 a 7,12 m/s až po 7,66 m/s [6]. V kombinaci s rychlostí lopatky pak může výsledná rychlost dopadu kapky dosáhnout hodnoty až 147,66 m/s pro silný dešť a rychlost lopatky 140 m/s. Metoda pulzujícího vodního svazku (PWJ) byla využita pro simulaci erozního působení deště. Pro prvotní přiblížení a urychlení erozního testování byla rychlost dopadu při experimentech v tomto článku zvolena 180 m/s. Pro další experimenty pak bude rychlost dopadu snižována na hodnoty odpovídající rychlosti dopadu kapek v provozních podmínkách.

* tel. +420 532 290 345, e-mail: poloprudsky@ipm.cz

Jedno z prvních pozorování vlivu dopadu kapek na polymerní kompozity vyztužené karbonovými vlákny (CFRP) bylo popsáno v práci N. L. Hancoxe [7] z roku 1973. V této práci byla eroze rozdělena na několik fází na základě mikroskopických projevů v závislosti na úběru materiálu a počtu dopadů kapek. Kumulativní úběr hmoty je v prvních dvou stádiích popsán jako „odběr vláken“ a „výskyt malých erozních kráterů“ vysoký a následně klesá s výskytem „větších erozních kráterů“ [7].

Eroze pulsujícím vodním svazkem je vyvolána pomocí přerušování kontinuálního vodního svazku. Tím dochází k vyvolání zvýšeného tlaku na povrch tělesa v čase prvotního kontaktu pevné a kapalně fáze. Vzniklé napětí je několikrát vyšší než napětí, které by na povrchu vytvářel nepřerušovaný vodní svazek. Tlak kontinuálního svazku je udán pomocí Bernoulliho rovnice (1).

$$p_s = \rho v^2 \quad (1)$$

kde p_s je stagnační tlak, ρ je hustota kapaliny a v je rychlost dopadu. Oproti tomu nárazový tlak p_{WH} známý jako „efekt vodního kladiva“ je možné zapsat pomocí rovnice (2)

$$p_{WH} = \rho C v \quad (2)$$

přičemž C je rychlost šíření zvuku v kapalině. Poloměr ovlivněné plochy r je možné vypočítat pomocí rovnice (3)

$$r = Rv/C \quad (3)$$

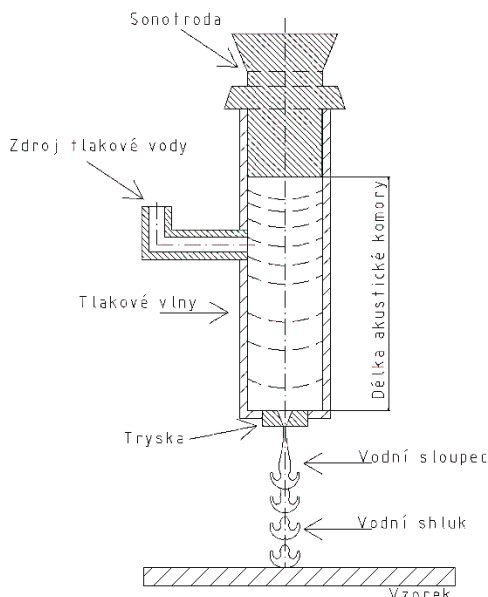
kde R je průměr interagující kapky. Délka působení nárazového tlaku se dá spočítat pomocí rovnice (4)

$$T = \frac{R}{v} \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \right] \quad (4)$$

Po skončení nárazového tlaku dojde k ustálení stagnačního tlaku [8].

Zařízení používaná na simulaci erozního zatížení jsou popsána v Keegan a spol [1]. První typ zařízení funguje na bázi rotujícího disku s otvorem. Při každé otáčce disku projde otvorem část vodního svazku, který se rozdělí na segmenty. Frekvence segmentů je v případě jednoho otvoru dána počtem otáček disku za sekundu. V případě více otvorového disku se jedná o násobek počtu otáček za sekundu. Segmentovaný svazek poté působí na stacionární těleso [1]. Modifikací této metody může být těleso připevněné na rotující disk, které prochází pod kontinuálním svazkem [9]. Druhý typ zařízení funguje na principu součásti rotující určitou rychlostí po kružnici, nad kterou je hydraulický rozvod s množstvím trysek. Počet dopadů kapek se spočítá z počtu otáček za sekundu, počtu trysek na dráze a doby expozice [10].

Zařízení použité pro experimenty v tomto příspěvku funguje na principu ultrazvukově modulovaného pulzního vodního svazku. Do akustické komory je přiváděna tlaková kapalina. Sonotroda v akustické komoře mění svou velikost s frekvencí 40kHz, tyto změny pak vyvolávají tlakové vlny v akustické komoře. Jakmile tlaková kapalina projde výstupní tryskou mění se tlakové vlny ve vlny rychlostní [11]. Nehomogenita v rychlostním profilu vodního svazku vede k rozpadu svazku na jednotlivé vodní shluky (viz Obr. 1). Tato metoda je hojně využívána pro zkoumání erozních stádií kovových materiálů [10,12,13] a také úpravu vlastností povrchu pomocí interakce vodních shluků s povrchem [14,15].

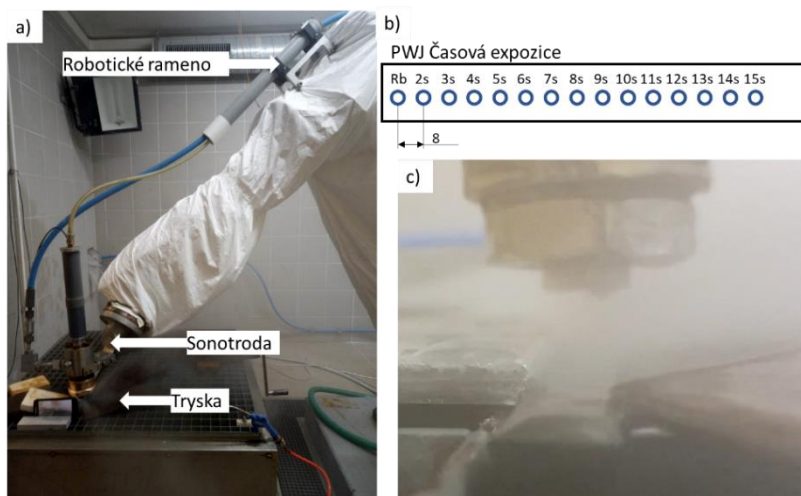


Obr.1 Schéma zařízení pro generaci vodních shluků

2. Experiment a metody

Pro experiment byl zvolen kompozitní materiál na bázi uhlíkových vláken. Jedná se o vrstvený symetrický kompozit, kde jsou vlákna nakloněna pod několika úhly. Kompozit má osm středově symetrických vrstev se směry vláken v sekvenci $[45, 0, 90, -45]$ spojenými pomocí matrice na bázi epoxidu. Detail kompozitu před experimentem je vidět na Pří experimentu došlo k vystavení povrchu kompozitu periodickému dopadu kapek vody o dané rychlosti a objemu. Narážející shluky byly generovány pomocí metody pulzujícího vodního svazku. Princip metody je vidět na Obr. 1 kde do akustické komory vstupuje voda pod tlakem řízeným hydraulickou pumpou HAMMELMANN HDP 253 (tlak až 250 MPa a průtok 40 l/min). V akustické komoře je sonotroda, která mění svou velikost o nastavenou amplitudu při frekvenci 40,42 kHz. Sonotroda je připojena na ultrazvukový generátor ECOSON WJ-UG-630-40. Pohyb tryskací hlavičky nad vzorkem byl uskutečňován pomocí robotického ramene třídy ABB robot IRB 6640–180/2.55.

V průběhu experimentu byla vytvořena experimentální řada erodovaných oblastí s postupně narůstající dobou expozice od 2 sekund až po 15 sekund (viz Obr. 2) odstupňovaných po 1 sekundě. Dobu expozice je v závislosti na frekvenci možné přepočítat na počet vodních shluků narážejících na povrch. V rámci tohoto experimentu byl povrch vystaven periodickému působení kapek s intenzitou od 80 840 impaktů až po 606 300 impaktů. Obr. 2a) zachycuje experimentální nastavení zařízení. Na Obr. 2b) je schéma rozložení experimentální řady s rostoucí dobou expozice na vzorku a Obr. 2c) zachycuje průběh interakce pulzního svazku s povrchem materiálu. Technologické parametry procesu jsou uvedeny v tabulce 1, hydraulické parametry v tabulce 2. Během experimentu byly nastaveny konstantní hodnoty všech hydraulických parametrů a dále byla konstantní vzdálenost trysky nad povrchem materiálu, frekvence a výkon sonotrody. Časová expozice se měnila skokově s intervalem 1s. Experimenty proběhly v rámci jednoho experimentálního bloku. Pro pozorování erozní hloubky byl použit konfokální mikroskop konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS3100 a pro pozorování erodované plochy byl použit rastrovací elektronový mikroskop Tescan LYRA 3 XMH FEG/SEMxFIB s urychlovacím napětím 2kV.



Obr. 2. Provedení experimentu: a) nastavení zařízení, b) schéma časové expozice, c) interakce svazku s povrchem kompozitu.

Tab. 1. Technologické parametry experimentu

Počet opakování [-]	Pracovní vzdálenost [mm]	Akustická komora [mm]	Frekvence sonotrody [kHz]	Výkon sonotrody [W]	Čas expozice [s]	Přírůstkový interval [s]
3	11	6	40,42	112	2-15	1

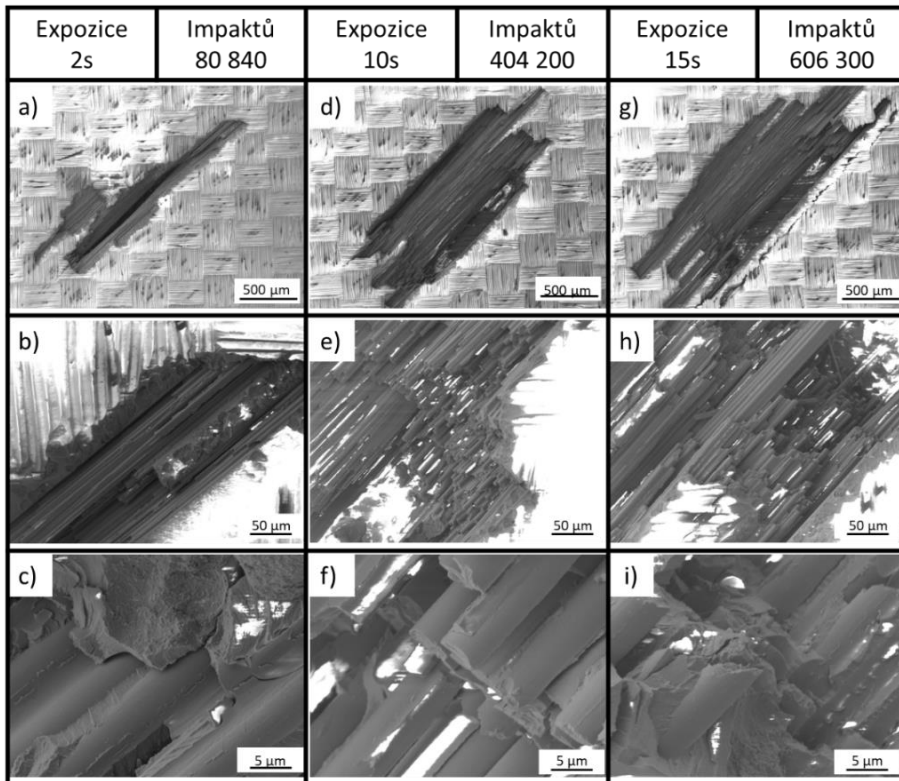
Tab. 2 Hydraulické parametry pulzního vodního svazku

Tlak [MPa]	Průměr trysky [mm]	Hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Plocha trysky [mm^2]	Průtok [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Rychlost toku* [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Hydraulický výkon [W]	Objem pulzu
20	0,2	998	$3,14\cdot 10^{-8}$	$5,66\cdot 10^{-6}$	184,18	115,73	$1,45\cdot 10^{-4}$

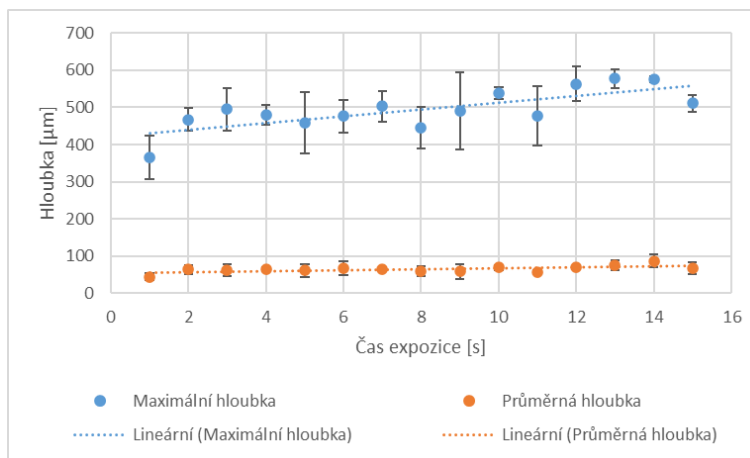
*účinnost trysky $\eta = 0.92$

3. Výsledky

Pozorování pomocí elektronové mikroskopie (Obr. 3) ukazuje již po expozici 2 sekundy (tomu odpovídá ~ 80 840 impaktů) signifikantní úběr materiálu (Obr. 3a). Krycí vrstva kompozitu je porušena a erozní kráter vzniká ve směru rovnoběžném se směrem vrchní vrstvy vláken. Okolí erozního kráteru vykazuje lehké stochasticky rozmístěné porušení. Obr. 3b ukazuje nejzazší okraj kráteru ve směru rovnoběžném se směrem vláken. Je patrné, že matrice byla erodována a zůstalo množství neporušených obnažených vláken. Na Obr. 3c jsou zbytky erodované matrice. Po 10 sekundách již došlo k porušení velkého množství vláken (Obr. 3d). Kráter je kromě směrovosti význačný i velmi prudkým úhlem stoupání/klesání. Po bocích kráteru je pozorovatelné množství porušených vláken (Obr. 3e). Mechanismus porušení je zachycen v detailu na Obr. 3f. Po 15 sekundách dochází k dalšímu prohlubování a rozšiřování kráteru (Obr. 3g). Je patrné nalomení vrchní vrstvy podél jednoho okraje kráteru. Obr. 3h zobrazuje strmé prohloubení kráteru od povrchu až k druhé vrstvě vláken. Obr. 3i zobrazuje detail poškozených vláken obalených maticí.



Obr. 3. Pozorování erodovaného kompozitu pomocí skenovacího elektronového mikroskopu v rozsahu 2s, 10s a 15s při zvětšení 69x, 500x a 5 000 x.



Obr. 4. Vliv časové expozice na průměrnou a maximální erozní hloubku

Obr. 4 zachycuje vývoj maximální a průměrné hloubky krátera pod bazální rovinou. Z grafu je patrný mírný nárůst hloubky se zvyšující se dobou expozice. Již po 2 sekundách je dosaženo výrazné eroze o maximální hloubce okolo 400 μm .

4. Závěr

Pomocí technologie PWJ byl CFRP kompozitu vystaven pulznímu vodnímu svazku o rychlosti toku 184 m/s a frekvenci 40KHz dopadů jednotlivých vodních shluků

- Při experimentu jsme se přiblížili rychlosti dopadů dešťových kapek na lopatky větrných turbín s velmi vysokou frekvencí. Technologie se jeví jako vhodná pro zrychlené erozní testy.
- Při rychlosti vodních shluků 184 m/s bylo pozorováno poškození vláken již po 2 sekundové expozici tedy po 80 840 impaktech.

Poděkování

Práce vznikla za finanční podpory projektu GAČR 23-05372S.

Literatura

- [1] Keegan, M. H., Nash, D. H., Stack, M. M. Modelling Rain Drop Impact of Offshore Wind Turbine Blades. in Volume 6: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy 887–898 American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [2] Kim, A., Kim, I. Solid particle erosion of CFRP composite with different laminate orientations. *Wear* 267, 1922–1926, 2009
- [3] Demirci, M., Bagci, M. Erosion Resistance of CFRP Composite Materials with Different Fiber Weaves Exposed to Cryogenic Treatment. *Tribol. Trans.* 64, 2021.
- [4] Hussien, A. A., Qasem, I., Kataraki, P. S., Al-Kouz, W. & Janvekar, A. A. Studying the Performance of Cutting Carbon Fibre-Reinforced Plastic Using an Abrasive Water Jet Technique. *Stroj. Vestn. – J. Mech. Eng.* 67, 135–141, 2021.
- [5] Altin Karataş, M., Motorcu, A. R., Gökkaya, H. Study on delamination factor and surface roughness in abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composites with different fiber orientation angles. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 43, 22, 2021.
- [6] Verma, A. S., Castro, S. G. P., Jiang, Z. & Teuwen, J. J. E. Numerical investigation of rain droplet impact on offshore wind turbine blades under different rainfall conditions: A parametric study. *Compos. Struct.* 241, 112096, 2020.
- [7] Hancox, N. L. The erosion of carbon fibre reinforced plastic by repeated liquid impact. *Wear* 23, 71–81, 1973.
- [8] Hancox, N. L. & Brunton, J. H. The Erosion of Solids by the Repeated Impact of Liquid Drops. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.* 260, 121–139, 1966.
- [9] Thomas G.P, Brunton J.H. Drop impingement erosion of metals. *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Sci.* 314, (1970)
- [10] Poloprudský, J., Chlupová, A., Šulák, I., Kruml, T. & Hloch, S. Surface and Subsurface Analysis of Stainless Steel and Titanium Alloys Exposed to Ultrasonic Pulsating Water Jet. *Materials* 14, 5212, 2021.
- [11] Foldyna, J., Sitek, L., Švehla, B. & Švehla, Š. Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects. *Ultrason. Sonochem.* 11, 131–137, 2004.
- [12] Lehocka, D. et al. Comparison of ultrasonically enhanced pulsating water jet erosion efficiency on mechanical surface treatment on the surface of aluminum alloy and stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 103, 1647–1656, 2019.
- [13] Nag, A., Hvizdos, P., Dixit, A. R., Petrů, J. & Hloch, S. Influence of the frequency and flow rate of a pulsating water jet on the wear damage of tantalum. *Wear* 477, 2021.
- [14] Srivastava, M. et al. Utilizing the water hammer effect to enhance the mechanical properties of AISI 304 welded joints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 119, , 2022.
- [15] Stolárik, G., Nag, A., Petrů, J., Svobodová, J. & Hloch, S. Ultrasonic Pulsating Water Jet Peening: Influence of Pressure and Pattern Strategy. *Materials* 14, 6019, 2021.