

# **E**xperimentální **A**nalýza **N**apětí **2003**

## **MEASUREMENT OF DYNAMIC PRESSURE IN ULTRASONIC NOZZLE** **MĚŘENÍ DYNAMICKÉHO TLAKU V ULTRAZVUKOVÉ TRYSCE**

Josef Foldyna<sup>1</sup>, Libor Sitek<sup>2</sup>, Pavel Jekl<sup>3</sup>, Daria Nováková<sup>4</sup>, Branislav Švehla<sup>5</sup>

*The ultrasonic modulation of high-speed water jet increases significantly its performance in applications of material cutting and surface cleaning. In spite of that we still endeavor to improve ultrasonic nozzle design and to optimize its configuration. One of possible ways to reach that objective is represented by utilization of direct measurement of behavior of dynamic pressure generated by the ultrasonic tool placed inside the nozzle. In this paper, the method of measurement of dynamic pressure in the ultrasonic nozzle is described and selected results obtained with various configurations of the ultrasonic nozzle are presented.*

### **Keywords**

water jet, modulated jet, ultrasonic modulation, dynamic pressure

vodní paprsek, modulovaný paprsek, ultrazvuková modulace, dynamický tlak

### **Úvod**

Technologie vysokorychlostního vodního paprsku zaznamenala v posledních desetiletích výrazný pokrok v aplikacích řezání a rozpojování materiálů, čištění a odstraňování povrchových vrstev. V současné době je pro tyto aplikace na trhu k dispozici celá řada systémů využívajících vysokorychlostní vodní a abrazivní paprsky. Maximální pracovní tlaky se v některých aplikacích pohybují až do 400 MPa, v jiných aplikacích se zase používají průtoky vody desítky a někdy i stovky l/min, výkony čerpadel mohou dosáhnout až 400 kW. I přesto je stále zapotřebí snažit se o další zdokonalení této technologie, aby se ještě lépe přizpůsobila stále náročnějším ekologickým požadavkům, dále se zvýšila její výkonnost a její použití bylo ekonomicky výhodnější.

Jeden z možných přístupů, jak dosáhnout zvýšení výkonnosti vodních paprsků, je vytvoření modulovaného pulzního paprsku. Podstatou je skutečnost, že impaktní tlak  $p_i$ ,

---

<sup>1</sup> Ing. Josef Foldyna, CSc.: Ústav geoniky AV ČR Ostrava, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: +420-596979111, e-mail: foldyna@ugn.cas.cz

<sup>2</sup> Ing. Libor Sitek, Ph.D.: Ústav geoniky AV ČR Ostrava, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: +420-596979111, e-mail: sitek@ugn.cas.cz

<sup>3</sup> Ing. Pavel Jekl.: Ústav geoniky AV ČR Ostrava, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: +420-596979111, e-mail: jekl@ugn.cas.cz

<sup>4</sup> Daria Nováková: Ústav geoniky AV ČR Ostrava, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: +420-596979111, e-mail: novakova@ugn.cas.cz

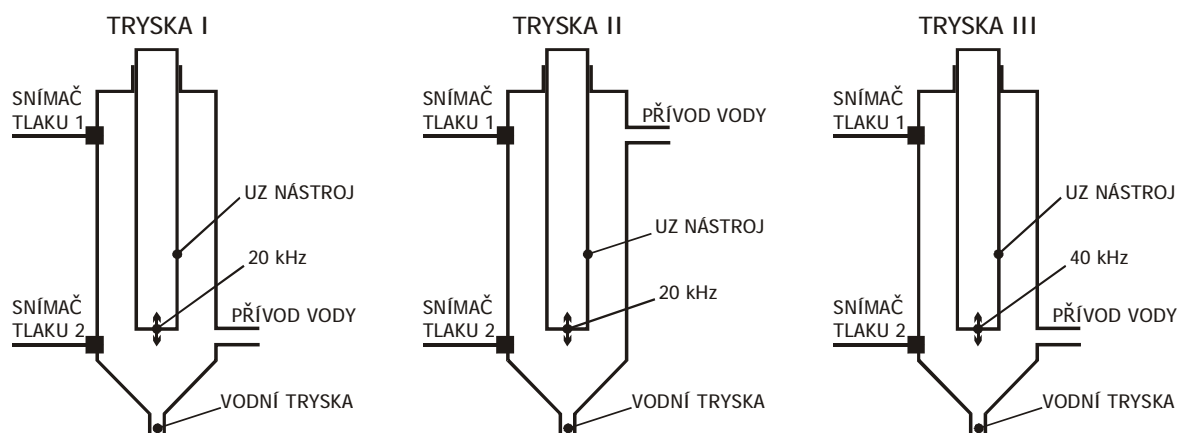
<sup>5</sup> Ing. Branislav Švehla: Ecoson spol. s r. o., Trenčianska 17, 916 01 Nové Mesto nad Váhom, tel.: +421 32 7716136, e-mail: ecoson@ecoson.sk

generovaný dopadem čela sloupce vody na kolmou plochu rychlostí  $v_0$ , je podstatně vyšší než stagnační tlak  $p_s$ , generovaný kontinuálním paprskem za jinak stejných podmínek (pro vodu platí zjednodušeně  $p_i/p_s = 2954/v_0$ ). Také další účinky vyvolané dopadem modulovaného pulzního paprsku, jako jsou např. zvýšená penetrace paprsku a únavové namáhání rozpojovaného materiálu, budou dále zvyšovat výkonnost modulovaných pulzních paprsků.

Proto probíhá v současné době na Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě rozsáhlý výzkum orientovaný na definování základních procesů probíhajících při ultrazvukové modulaci jak uvnitř, tak vně ultrazvukové trysky. Cílem je zdokonalit konstrukci ultrazvukové trysky a optimalizovat její uspořádání s využitím přímého měření dynamického tlaku generovaného ultrazvukovým nástrojem vloženým do trysky.

## Ultrazvuková modulace vodního paprsku

Ultrazvuková modulace vodního paprsku je v podstatě vytvářena podélnými vibracemi ultrazvukového nástroje umístěného v trysce. Tyto podélné vibrace jsou generovány v ultrazvukovém měniči a z měniče do vody v trysce se přenášejí prostřednictvím přenosové linky skládající se z vlnovodu a transformátoru rychlosti (ultrazvukového nástroje). Amplituda vibrací hrotu UZ nástroje závisí na faktoru zesílení přenosové linky, jejich energetických ztrátách a na amplitudě vibrací měniče. Příklady možných konceptů



Obr. 1 Schematické znázornění konfigurace ultrazvukové trysky

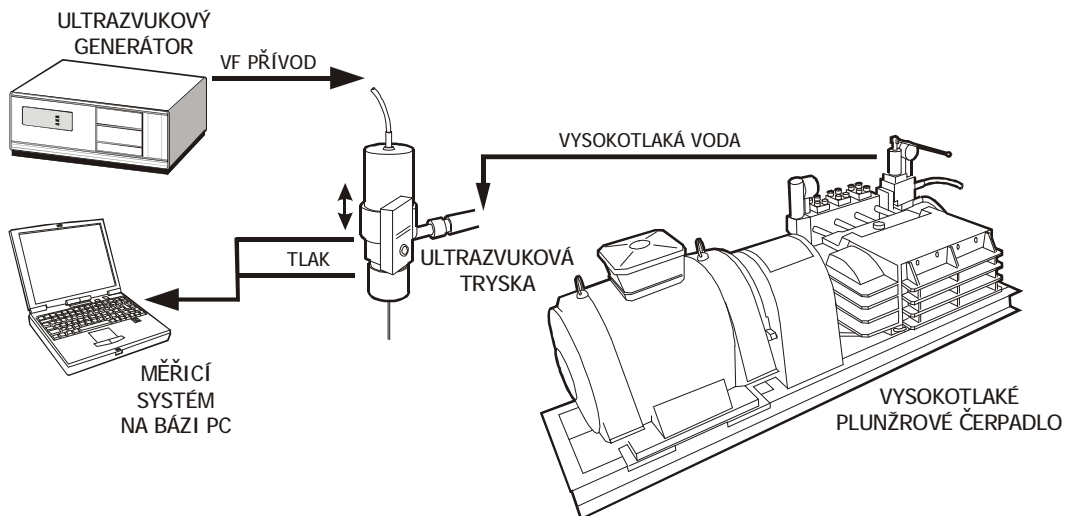
ultrazvukové trysky a jejich uspořádání je možno nalézt např. v [1], [2], [3] a [4].

V našich experimentech byly pro modulaci vodního paprsku použity piezoelektrické měniče o frekvencích 20 a 40 kHz, napájené UZ generátorem s maximálním výkonem 630 W. Ultrazvukové nástroje byly vyrobeny z vysokopevnostního duralu (CERTAL). Zkoumány byly tři konfigurace ultrazvukové trysky (viz obr. 1): (i) tryska osazená piezoelektrickým měničem 20 kHz a přívodem vody dole (tryska I), (ii) tryska osazená piezoelektrickým měničem 20 kHz a přívodem vody nahoře (tryska II) a (iii) tryska osazená piezoelektrickým měničem 40 kHz a přívodem vody dole (tryska III).

## Experimentální zařízení

Zařízení použité při experimentálním měření dynamického tlaku sestávalo ze zdroje vysokotlaké vody, ultrazvukové trysky (viz výše) a měřicího systému na bázi PC (viz obr. 2).

Jako zdroj vysokotlaké vody bylo použito vysokotlaké plunžrové čerpadlo s průtokem vody až  $43 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  a pracovním tlakem do 120 MPa. Na výstupu z čerpadla byl umístěn



Obr. 2 Schéma experimentálního zařízení

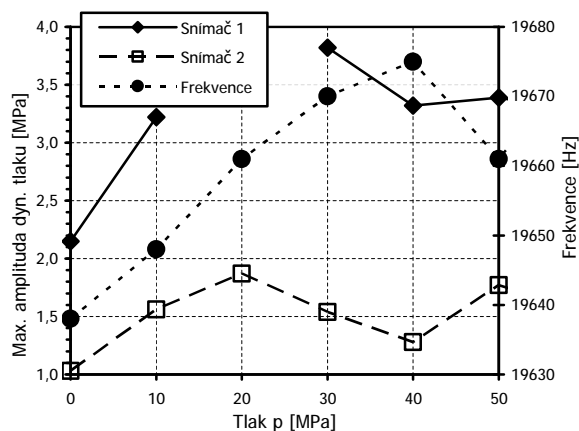
kalibrovaný piezorezistivní tlakový snímač Kristal RAG25A1000BC1H, který byl využíván při nastavování pracovního tlaku.

Dynamický tlak v trysce byl měřen kalibrovanými piezoelektrickými snímači tlaku KISTLER 6211. Signály ze snímačů byly zesíleny v nábojových zesilovačích KISTLER 5007, sběr a zpracování naměřených dat byl prováděn pomocí měřicího systému na bázi notebooku s docking station vybavenou DAQ kartou National Instruments PCI-MIO-16E-1 s využitím grafického vývojového prostředí LabVIEW FDS verze 6.1.

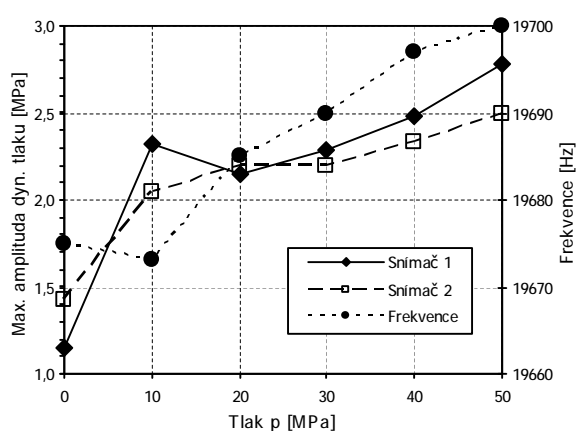
## Výsledky a diskuze

V rámci experimentálního programu orientovaného na zjišťování úrovně dynamického tlaku v ultrazvukové trysce byly mimo jiné uskutečněny série experimentů zaměřených na stanovení vlivu pracovního tlaku a relativní pozice ultrazvukového nástroje vzhledem k ústí trysky na dynamický tlak generovaný v různých konfiguracích ultrazvukové trysky.

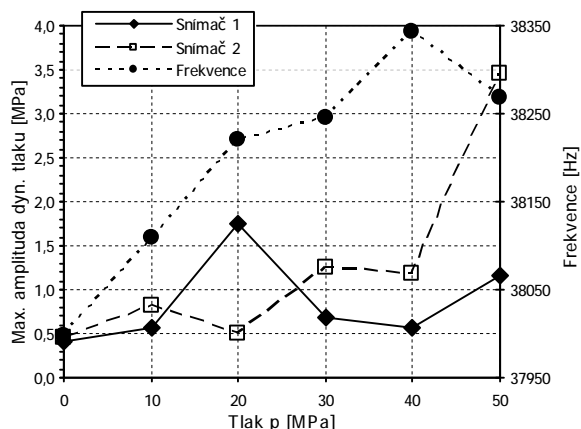
Dynamický tlak byl snímán 2 piezoelektrickými snímači tlaku (vlastní frekvence snímačů je 180 kHz), jejichž umístění je schematicky znázorněno na obr. 1. Měřený signál byl vzorkován rychlostí 250 000 vzorků/s a následně převáděn do frekvenční domény pomocí FFT. Z frekvenční domény signálu byla určována hodnota maximální amplitudy



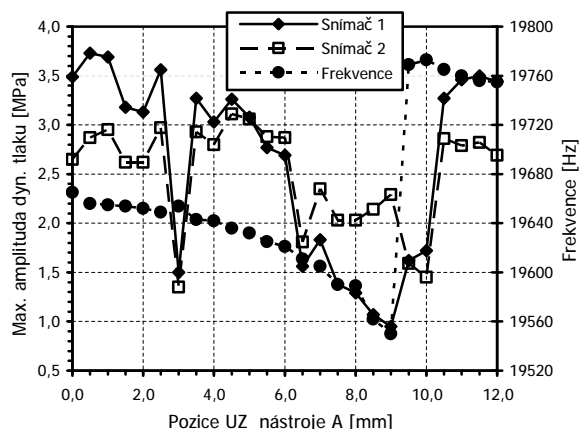
Obr. 3 Vliv tlaku na max. amplitudu dynamického tlaku a její frekvenci – tryska I



Obr. 4 Vliv tlaku na max. amplitudu dynamického tlaku a její frekvenci – tryska II



Obr. 5 Vliv tlaku na max. amplitudu dynamického tlaku a její frekvenci – tryska III



Obr. 6 Vliv pozice UZ nástroje na max. amplitudu dynamického tlaku a její frekvenci – tryska II

dynamického tlaku a jí odpovídající frekvence. Výsledky byly zpracovány ve formě grafů.

### Vliv pracovního tlaku

Vliv pracovního tlaku na velikost maximální amplitudy dynamického tlaku a jí odpovídající frekvenci byl zjišťován u všech tří konfigurací ultrazvukové trysky, osazených vodní tryskou o průměru 1,19 mm. Pracovní tlak byl měněn v rozsahu 0,5 až 50 MPa, ultrazvukový výkon generátoru byl nastaven na maximum.

Výsledky měření ukazují výrazné rozdíly v úrovních a průbězích dynamického tlaku vyvolaných v trysce během ultrazvukové modulace, a to jak mezi jednotlivými konfiguracemi ultrazvukové trysky, tak i vlivem změny tlaku. Příklady vlivu pracovního tlaku na maximální amplitudu dynamického tlaku a její frekvenci jsou pro jednotlivé konfigurace UZ trysky uvedeny na obr. 3, 4 a 5. Získané výsledky naznačují, že se zvyšujícím se pracovním tlakem dochází ke změně frekvence, při níž amplituda dynamického tlaku dosahuje svého maxima. Je to způsobeno pravděpodobně změnou vlastní frekvence celé kmitající soustavy, tj. UZ nástroje + UZ trysky. Tato změna vlastní frekvence v důsledku změny pracovního tlaku však je poměrně malá a je možno ji tudíž kompenzovat ladicím obvodem UZ generátoru. Za povšimnutí rovněž stojí rozdílné hodnoty maxim amplitud dynamického tlaku naměřených snímačem 1 a 2 v jednotlivých konfiguracích UZ trysky. Tyto výsledky naznačují, že umístění přívodu vysokotlaké vody do UZ trysky je zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost.

### Vliv pozice ultrazvukového nástroje

Vliv pozice ultrazvukového nástroje vzhledem k ústí trysky na maximální amplitudu dynamického tlaku a jí odpovídající frekvenci byl zjišťován pro ultrazvukovou trysku II, osazenou vodní tryskou o průměru 1,19 mm. Pracovní tlak byl nastaven na 50 MPa, ultrazvukový výkon generátoru byl nastaven na maximum. Pozice ultrazvukového nástroje vzhledem k referenčnímu bodu byla měněna v rozsahu 0 – 12 mm s krokem 0,5 mm.

Výsledky měření naznačují, že za daných podmínek dochází k relativně značnému vlivu pozice UZ nástroje na maximální amplitudu dynamického tlaku a jí odpovídající frekvenci. Jak je vidět na obr. 6, při změně relativní pozice UZ nástroje z hodnoty 9,0 mm na 9,5 mm dochází ke skokové změně frekvence o zhruba 200 Hz, při níž dochází k maximální amplitudě dynamického tlaku. To naznačuje, že změnou pozice UZ nástroje vzhledem k ústí vodní

trysky dochází k „přeladování“ celé kmitající soustavy. Pro danou konfiguraci UZ trysky a dané hydraulické parametry je tedy žádoucí „naladit“ UZ trysku pro optimální výkon.

## **Závěr**

Výsledky měření dynamického tlaku v ultrazvukové trysce ukázaly, že mezi jednotlivými testovanými konfiguracemi existují výrazné rozdíly v úrovních a průbězích dynamického tlaku, vyvolaných v trysce ultrazvukovou modulací. Podobné rozdíly byly zjištěny také jako důsledek změny pracovního tlaku. Ukázalo se také, že se zvyšujícím se pracovním tlakem dochází ke změně vlastní frekvence celé kmitající soustavy (ultrazvukové trysky).

Dosažené výsledky dále naznačují značný vliv pozice UZ nástroje na maximální amplitudu dynamického tlaku a jí odpovídající frekvenci, proto je tedy žádoucí „naladit“ danou konfiguraci UZ trysky pro optimální výkon.

## **Poděkování**

Výzkumná práce v oblasti vysokorychlostních pulzních paprsků byla uskutečněna v rámci projektů GA AVČR (reg. č. IAA2086001) a GA ČR (reg. č. 105/03/0183).

## **Literatura**

- [1] Puchala, R.J., Vijay, M. M.: Study of an ultrasonically generated cavitating or interrupted jet: Aspects of design – Proceedings of the 7th International Symposium on Jet Cutting Technology, Ottawa, Paper B2: pp. 69-82, 1984
- [2] Vijay, M. M.: *Ultrasonically generated cavitating or interrupted jet* – U. S. Patent No. 5,154,347, 1992
- [3] Vijay M. M., Foldyna J.: *Ultrasonically Modulated Pulsed Jets: Basic Study* – 12<sup>th</sup> International Conference on Jet Cutting Technology, N. G. Allen (Editor), BHR Group Conference Series, Publication No. 13, Mechanical Engineering Publications Limited, London, pp. 15-35, 1994
- [4] Foldyna, J., Sitek, L., Jekl, P., Nováková, D.: *Measurement of force effects of modulated jet* – Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Conference Experimental Stress Analysis – EAN 2001 Tábor, Jírová, Jiroušek, Kult (eds.), CTU in Prague, pp. 63 – 68, 2001