



## Závěrečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0490**

**Detekcia erózných účinkov pulzujúceho vodného prúdu na materiál**

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Sergej Hloch, PhD.**

Prijemca **Technická univerzita v Košiciach - Fakulta výrobných technológií, Prešov**

### Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Fakulta výrobných technológií TUKE so sídlom v Prešove

### Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Institute of Geonics of the Czech Academy of Sciences, Czech Republic  
Faculty of Mechanical Engineering, J. E. Purkyně University in Ústí nad Labem, Czech Republic  
Institute of Physics of Materials Czech Academy of Sciences, Brno, Czech Republic  
Indian Institute of Technology (Indian School of Mines), Dhanbad, 826004, Jharkhand, India  
Inspire AG, ETH Zurich, Zurich, Switzerland  
Steinbeis Consulting Center High-Pressure Waterjet Technology, Horgau, Germany  
Faculty of Mechatronics and Medical Engineering, Ulm University of Applied Sciences, Ulm, Germany  
Faculty of Mechanical Engineering and Vehicle Engineering, Ulm University of Applied Sciences, Ulm, Germany  
Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Smetanova ul, Maribor, 172000, Slovenia  
Department of Mechanical Engineering, Vysoká Škola Bánská, Technical University, Ostrava, 70800, Czech Republic

### Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

n.a.

### Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Srivastava, M., Hloch, S., Krejci, L., Chattopadhyaya, S., Gubeljak, N., Milkovic, M. Utilizing the water hammer effect to enhance the mechanical properties of AISI 304 welded joints (2022) International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119 (3-4), pp. 2317-2328. Cited 3 times.

Hloch, S., Souček, K., Svobodová, J., Hromasová, M., Müller, M. Subsurface microtunneling in ductile material caused by multiple droplet impingement at subsonic speeds (2022) Wear, 490-491, art. no. 204176, . Cited 1 time.

Stolárik, G., Nag, A., Petruž, J., Svobodová, J., Hloch, S. Ultrasonic pulsating water jet

peening: Influence of pressure and pattern strategy (2021) *Materials*, 14 (20), art. no. 6019, . Cited 2 times.

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 (2021) *Wear*, 477, art. no. 203893, . Cited 7 times.

Nag, A., Hloch, S., Dixit, A.R., Pude, F. Utilization of ultrasonically forced pulsating water jet decaying for bone cement removal (2020) *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110 (3-4), pp. 829-840. Cited 11 times.

Tripathi, R., Hloch, S., Chattopadhyaya, S., Klichová, D., Ščučka, J., Das, A.K. Application of the pulsating and continuous water jet for granite erosion (2020) *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 126, art. no. 104209, . Cited 21 times.

Tripathi, R., Hloch, S., Chattopadhyaya, S., Klichová, D., Klich, J. Influence of frequency change during sandstone erosion by pulsed waterjet (2020) *Materials and Manufacturing Processes*, 35 (2), pp. 187-194. Cited 11 times.

Hloch, S., Nag, A., Pude, F., Foldyna, J., Zeleňák, M. On-line measurement and monitoring of pulsating saline and water jet disintegration of bone cement with frequency 20 kHz (2019) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 147, art. no. 106828, . Cited 17 times.

Nag, A., Hloch, S., Čuha, D., Dixit, A.R., Tozan, H., Petrů, J., Hromasová, M., Müller, M. Acoustic chamber length performance analysis in ultrasonic pulsating water jet erosion of ductile material (2019) *Journal of Manufacturing Processes*, 47, pp. 347-356. Cited 23 times.

Srivastava, M., Hloch, S., Gubeljak, N., Milkovic, M., Chattopadhyaya, S., Klich, J. Surface integrity and residual stress analysis of pulsed water jet peened stainless steel surfaces (2019) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 143, pp. 81-92. Cited 34 :

Hloch, S., Adamčík, P., Nag, A., Srivastava, M., Čuha, D., Müller, M., Hromasová, M., Klich, J. Hydrodynamic ductile erosion of aluminium by a pulsed water jet moving in an inclined trajectory (2019) *Wear*, 428-429, pp. 178-192. Cited 29 times.

Raj, P., Hloch, S., Tripathi, R., Srivastava, M., Nag, A., Klichová, D., Klich, J., Hromasová, M., Müller, M., Miloslav, L., Chattopadhyaya, S., Adamcik, P. Investigation of sandstone erosion by continuous and pulsed water jets (2019) *Journal of Manufacturing Processes*, 42, pp. 121-130. Cited 25 times.

Major revision: Stolarík, G., Svobodová, J., Klichová, D., Nag, A., Hloch, S. Titanium surface roughening with ultrasonic pulsating water jet. *Journal of Manufacturing Processes*. (SMEJMP-D-22-03475)

Prednášky:

2019 J.J. Strossmayer University, (Advanced Manufacturing Technologies)

2020 J.J. Strossmayer University, lectures for PhD. students (Research Methodology)

2020 University of Technology at Belfort and Montbéliard (Jet D'eau traitement des surfaces)

2021 Winter CIRP Meeting, Paris (Utilization of the Water hammer Effect for Controlled Erosion of Bone Cement)

2022 Invited Lecture "Water Droplet as a Tool?"

2022 Invited Lecture "Surface treatment using liquid droplet impingement" German Engineering Society in Lorrach

### **Uplatnenie výsledkov projektu**

Napriek tomu, že sa jednalo o projekt základného výskumu (hindex projektu = 9) počas, ktorého sme výrazne rozšírili poznatky interakcie viacnásobného pôsobenia vodných kvapiek, generovaných hybridnou technológiou (ultrazvukom budeným pulzujúcim vodným prúdom), s rôznymi materiálmi, početné výsledky publikované 23 impaktovaných časopisoch, naznačujú cestu možných aplikácií pre oblasť materiálového inžinierstva, bio-inžinierstva s možnosťou riešenia problémov v rámci globálnych klimatických zmien.

Čo sme dosiahli:

Bio-mimetický dizajn trabekulárneho tkaniva v bio-materiáloch (titánová zliatina alebo V-ALLOY dentálna zliatina) pomocou viacnásobného kvapôčkového dopadu - úprava povrchov biomateriálov s vysokou kapilárnou eleváciou pre drieky endoprotéz.

Zvýšiť životnosť súčiastok cestou lepšej mechanickej odolnosti povrchovej vrstvy.

Minimalizácia technologických vstupov, oproti konvenčnému kontinuálnemu prúdu, so širokospektrálnym praktickým využitím napr. pre výskum a vývoj minimálne invazívnej studenej selektívnej operačnej techniky pre rýchle odstránenie kostného cementu.

Budúcnosť:

V oblasti bioaplikácie PWJ, výsledky podnietili myšlienku "Skúmania rastu kostných buniek" na upravených materiáloch, na ktorých bude nanosený hydroxyapatit.

V oblasti kultúrneho dedičstva - výskum ochrany kultúrneho dedičstva (pieskovcové reliéfy) - skúšanie eróznej odolnosti aplikovaných a novovyvíjaných ochranných vrstiev.

V oblasti skúšania materiálov: otvára možnosti pre výskum a vývoj na vytvorenie univerzálnej rýchlej skúšobnej metódy pre stanovenie eróznej odolnosti materiálov.

Pedagogika:

V pedagogickej praxi, obohatenie predmetu "Progresívne technológie alebo Nekonenčné technológie" o technológiu Ultrazvukom budeného pulzujúceho vodného prúdu.

### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)**

Hoci sa všeobecne erózia považuje za prítlačujúci jav, predstavujúci špecifický degradačný proces materiálu, ktorý vedie k strate hmoty, objasnenie javov súvisiacich s interakciou kvapiek a povrchom materiálu je možné využiť nielen na kontrolovanú dezintegráciu materiálov, ale aj na ich povrchovú úpravu. Za týmto účelom boli skúmané účinky hybridnej technológie - ultrazvukom budeného vodného prúdu (PWJ). Oproti existujúcim generátorom kvapiek (napr. rotujúcich diskov), má táto technológia výhodu v množstve variácií parametrov kvapiek: rýchlosti, hustoty, uhla dopadu. Efektívne prejavy účinkov kvapiek nastávajú v určitej vzdialenosti od povrchu materiálu vzhľadom na aktuálnu frekvenciu akustického generátora. Z tohto dôvodu bolo potrebné najprv vytvoriť nové metodické postupy, ladenia sústavy do rezonancie, aby bolo možné zabezpečiť opakovateľnosť a spoľahlivosť výsledkov. Pomocou akustickej a vibračnej emisie sme skúmali odozvu materiálu s cieľom získať exaktné údaje v reálnom čase. Korelácia medzi hĺbkovým profilom a AE odhalila efektívnu interakciu medzi dynamickým signálom a procesom deformácie materiálu počas pôsobenia periodicky pôsobiacim PWJ. Z hľadiska konvenčnej fenomenológie boli naše experimentálne pozorovania založené na možnom využití vlnovej teórie pre PWJ, ktorú možno považovať za nositeľa vlny s frekvenciou 20 kHz. V porovnaní s kontinuálnym prúdom, rýchlosť a hybnosť PWJ prechádzajúcej dýzou možno opísať ako jednoduchú sínusovú funkciu, kde dominantná harmonická zložka v matematickej funkcii sa vyskytuje v reálnej rovine. V závislosti od podmienok, podľa klasickej mechaniky a väčšiny konvenčných prístupov, existujú dva prípady deformácie pri periodickej aktivite vodných vln (PWJ) dopadajúcich na materiál. Ak nedôjde k plastickej deformácii, potom oblasť pod krivkou medze klzu vyjadrená Hookeovým zákonom patrí do elastickej oblasti. Nedochádza k útlmu nosnej vlny a materiál má vlastnosti vysieláča, ktorým sa vlna šíri bez deformácie. Ak dôjde k plastickej deformácii, potom oblasť nad medzou klzu, konkrétne nelineárna oblasť, môže byť vyjadrená rovnicou  $A$  (vstupný signál)  $\pm$  Útlm =  $A$  (výstupný signál.) Následne prebehli rozsiahle experimenty s cieľom stanoviť erózne intervaly, zahŕňajúce inkubačné, akceleračné, kulminujúce a terminálne štádium. Inkubačné a akceleračné štádium je možné využiť pre úpravu povrchov. Pre inkubačnú fázu je typické zvýšenie hustoty dislokácií a spevneniu podpovrchovej vrstvy. Predbežné výsledky naznačujú, že je možné zvýšiť únavovú odolnosť súčiastok. Keďže impaktný tlak kvapky, závisí od rýchlosti, hustoty a akustickej rýchlosti tlakovej vlny, ktorá sa šíri rýchlosťou zvuku, je možné vysokofrekvenčným pôsobením kvapiek, rýchlejšie vyčerpať miestnu plasticitu v dôsledku zníženia časového intervalu mechanickej relaxácie materiálu. Preto je možné uskutočňovať procesy pri tlakoch, ktoré sú nižšie ako 50 MPa, čo je výhoda oproti konvenčnému vodnému prúdu, ktorý je generovaný pri cca 400 MPa za účelom kompenzácie stagnačného tlaku. Pomocou röntgenového  $\mu$ -CT bola pod povrchom identifikovaná sieť dutín podobnej fraktálnemu tvaru. Schopnosť penetrácie PWJ nekončí vytvorením drážky, ale pokračuje do jadra materiálu vo forme mikrotryskania, tunelovania alebo prepichovania. Z tohto hľadiska boli identifikované dva typy týchto dutín, slepé a prechodné, s priemerom niekoľkých mikrometrov. Výsledky naznačujú, že účinok laterálneho prúdenia po kolapse kvapiek spôsobuje rozsiahle hydrodynamické tunelovanie v materiáli, ktoré je oveľa vyššie počas intenzívneho periodickeho pôsobenia kvapiek vody, dokonca aj pri podzvukových rýchlostiach. U kontinuálnych vodných prúdov, takéto javy neboli zistené. Táto indícia viedla

následne k rozsiahlym experimentom, riadených povrchových úprav, titánového povrchu s vysokým stupňom kapilárnej elevácie, ktorých štruktúry pripomínajú trabekulárnu štruktúru. V tejto štúdii sme analyzovali modifikované morfológie a integritu titánovej zliatiny Ti6Al4V pomocou dopadu vodných kvapiek generovaných PWJ pri štartovacích frekvenciách  $f_s = 20$  kHz a 40 kHz. Kvapky vody boli distribuované pozdĺž lineárnej trajektórie posunu. Porovnali sa dve prechodové metódy na výrobu modifikovaných povrchových morfológií, jedna s jedným prechodom a druhá s dodatočným sekundárnym priečnym prechodom. Výsledky pozitívne podporujú počiatočné náznaky, že povrchová úprava PWJ by bola výhodnejšou alternatívou ako iné techniky založené na použití pevných častíc na povrchovú eróziu, ktorých artefakty sa môžu kontaminovať povrch.

### **Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)**

Although water droplet erosion is generally considered as an aggravating phenomenon, representing a specific material degradation process that leads to mass loss, the clarification of phenomena related to the interaction of droplets and the material surface can be used not only for the controlled disintegration of materials, but also for their surface treatment. For this purpose, the effect of hybrid technology - ultrasonically stimulated water jet (PWJ) - was investigated. Compared to existing droplet generators (e.g. rotating disks), this technology has an advantage in the number of variations of droplet parameters: speed, density, impact angle. Effective manifestations of droplet effects occur at a certain distance from the surface of the material due to the actual frequency of the acoustic generator. For this reason, it was first necessary to create new methodological procedures, tuning the system into resonance, in order to ensure the repeatability and reliability of the results. Using acoustic and vibration emission, we investigated the response of the material in order to obtain exact data in real time. The correlation between the depth profile and AE revealed an effective interaction between the dynamic signal and the material deformation process during the action of the periodically acting PWJ. From the point of view of conventional phenomenology, our experimental observations were based on the possible use of wave theory for the PWJ, which can be considered as a carrier wave with a frequency of 20 kHz. Compared to a continuous jet, the velocity and momentum of a PWJ passing through a nozzle can be described as a simple sinusoidal function, where the dominant harmonic component in the mathematical function occurs in the real region. Depending on the conditions, according to classical mechanics and most conventional approaches, there are two cases of deformation under periodic water wave activity (PWJ) impinging on a material. If there is no plastic deformation, then the area under the yield curve expressed by Hooke's law belongs to the elastic area. There is no attenuation of the carrier wave and the material has the properties of a transmitter through which the wave propagates without deformation. If plastic deformation occurs, then the region above the yield strength, specifically the nonlinear region, can be expressed by the equation  $A$  (input signal)  $\pm$  Attenuation =  $A$  (output signal.) Subsequently, extensive experiments were conducted to determine the erosion intervals, including incubation, acceleration, culminating and terminal stage. The incubation and acceleration stage can be used for surface treatment. The incubation phase is characterized by an increase in the density of dislocations and strengthening of the subsurface layer. Preliminary results indicate that it is possible to increase the fatigue resistance of components. Since the impact pressure of the drop depends on the speed, density and acoustic speed of the pressure wave, which propagates at the speed of sound, it is possible to use the high-frequency action of the drops to exhaust the local plasticity more quickly due to the reduction of the time interval of mechanical relaxation of the material. Therefore, it is possible to carry out processes at pressures that are lower than 50 MPa, which is an advantage over the conventional water jet, which is generated at about 400 MPa in order to compensate for the stagnation pressure. Using X-ray  $\mu$ -CT, a fractal-like network of cavities was identified beneath the surface. The penetration ability of PWJ does not end with the formation of a groove, but continues into the core of the material in the form of tunneling or piercing. From this point of view, two types of these cavities have been identified, blind and transitional, with a diameter of several micrometers. The results indicate that the lateral flow effect after droplet collapse causes extensive hydrodynamic tunneling in the material, which is much higher during intense periodic action of water droplets, even at subsonic speeds. For continuous water jet, such phenomena was not observed. This clue subsequently led to

extensive experiments, controlled surface treatments, a titanium surface with a high degree of capillary elevation, the structures of which resemble the trabecular structure. In this study, we analyzed the modified morphology and integrity of the Ti6Al4V titanium alloy using the impact of water droplets generated by PWJ at the starting frequencies  $f_s = 20$  kHz and 40 kHz. The water droplets were distributed along a linear displacement trajectory. Two transition methods were compared to produce modified surface morphology, one with a single transition and the other with an additional secondary transverse transition. The results positively support initial indications that PWJ surface treatment would be a preferable alternative to other techniques based on the use of solid particles for surface erosion, whose solid artifacts may contaminate the surface.