



## **VYUŽITÍ 3D PROFILOMETRIE V ENERGETICE**

### **USING 3D PROFILEMETRY IN POWER ENGINEERING**

**Pavel ZAHŘÁDKA\*, Vlastimil HABRCETL\*, Jan PATERA\***

\*Centrum Výzkumu Řež, s.r.o.

#### **Abstrakt**

*3D skenování patří mezi dynamicky se rozvíjející obory, které nacházejí využití v čím dál širším spektru technologických odvětví. Přináší zcela nové možnosti pro rozměrovou kontrolu komponent a nabízí komplexní možnosti hodnocení jejich kvality. V současné době je vývoj 3D skenerů směřován zvláště pro aplikace v automobilovém průmyslu a skenování se začíná prosazovat i v oblasti energetiky. Na trhu jsou k dostání různé typy skenerů, nejlepší kombinace přesnosti a variability pro použití v energetice se podařilo dosáhnout s laserovým ramenovým skenerem. Při skenování se uplatňuje zejména přechod od bodového měření k integrálnímu plošnému a objevují se i zcela nové nestandardní aplikace. Dostatečně vysoká přesnost skenerů a nástroje post-processingu umožňují hodnotit povrchové vady materiálu a 3D skenování je tak možno zařadit mezi doplňkové NDT metody. Tento příspěvek se převážně věnuje použití laserového ramenového skeneru v energetice a dalším speciálním aplikacím.*

**Klíčová slova:** 3D skenování, důlková koroze, tečení materiálu, kavitace

#### **Abstract**

*3D scanning is one of the dynamically evolving industries that find use in a wide scope of technology branches. It offers new possibilities for dimensional examination of components and offers comprehensive possibilities for evaluation of their quality. Currently, the development of 3D scanners is focused especially on automotive industry applications and 3D scanning is becoming increasingly used in the power industry. Different types of scanners are available on the market, and the best combination of precision and variability for the energetics use has been achieved with the laser arm scanner. In particular, transition from the point measurement to the integral surface scanning takes place. New non-standard applications also appear. Sufficiently high accuracy of scanners and use of post-processing tools make it possible to evaluate surface defects of material, and 3D scanning can thus be classified as an additional NDT method. This paper is mainly addressed to the use of a laser arm scanner in power engineering and to other special applications.*

**Key words:** 3D scan, pitting, creep, cavitation

## 1. Úvod

Technologie 3D skenování v současnosti zažívá nebývalý rozmach, neboť díky neustále se zvyšující přesnosti skenerů nachází uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Tradičně nejpoužívanější je tato technologie v automobilovém průmyslu, avšak začíná se prosazovat i v oblastech jako např. textilní průmysl, kde po naskenování povrchu lidského těla software generuje střihy přesně podle typu postavy, v zemědělství, kde 3D skener navádí automatickou odsávačku mléka, archeologie, kde se roboticky skenují celé komplexy chodeb v pyramidách, ve stavebnictví, kde je běžné skenování domů, mostů, historických objektů i celých měst statickými skenery, skenery na dronech či případně větší laserové skenery na letadle.

3D skenování v oblasti energetiky tvoří několik specifických aplikací, s unikátním způsobem měření a hodnocení. NDT laboratoř společnosti CVŘ s.r.o. se zaměřuje mj. na služby veřejného výzkumu spojené s prodlužováním životnosti komponent jaderných, klasických a vodních elektráren, které zahrnují zejména defektoskopické kontroly, hodnocení stavu povrchu, opotřebení, a monitorování rozvoje nejen korozních defektů, kde 3D skenování nabízí nové možnosti hodnocení zbytkové životnosti technologií a predikci rozvoje stavu při dalším provozu.

## 2. Metody 3D skenování

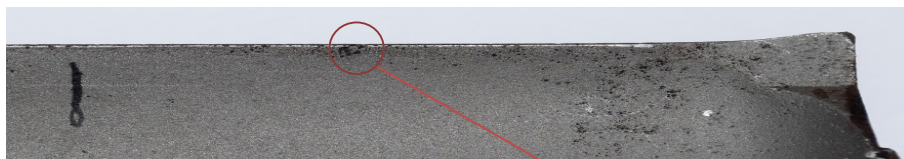
V rámci projektu se společností ČEZ a.s. s využitím informací z EPRI jsme testovali většinu typů skenerů s ohledem na přesnost zařízení a jeho použitelnost za geometrických omezení, plynoucích z provozních podmínek [1]. Jako nejuniverzálnější jsme zvolili velmi přesný ramenný skener s integrovaným laserovým skenerem RS4, který snímá až 752 000 bodů za sekundu s přesností stanovení bodů 28  $\mu\text{m}$ . Díky 7 kloubům je velmi variabilní a umožňuje měření i velmi malých prostorů. Pomocí několika speciálních stativů, vyrobených v CVŘ s.r.o., je možné jej upnout i na tvarově složité plochy feromagnetických materiálů. V provozu jsou skenované díly často zabudovány v technologii a není možné je vymontovat nebo je umístit na nehybnou plochu. Měření probíhá většinou z lešení nebo ve stísněných prostorech bez jakéhokoliv pevného bodu, které naprostá většina skenerů vyžaduje. Pro každou takovou úlohu proto máme k dispozici speciální přípravek.



Obr. 1 Ramenný laserový skener  
Fig. 1 Laser arm scanner

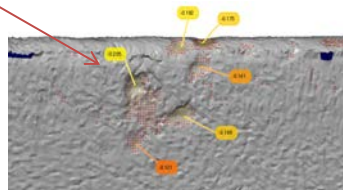
Pro některé aplikace používáme optický skener, který má horší skenovací parametry než ramenový skener. Snímá 210 000 bodů za sekundu s přesností stanovení bodů 50  $\mu\text{m}$  a vyžaduje neustálý vizuální kontakt mezi trackerem a skenerem v prostoru cca 2  $\text{m}^3$ . Jeho výhodou je možnost skenovat nestabilní objekty pomocí infradiod připevněných na měřeném objektu. Tracker je tak schopný detekovat pohyb objektu způsobený např. vibracemi a posun okamžitě kompenzovat automatizovaným dopočtem souřadnic.

Velmi dobrých výsledků se podařilo dosáhnout v projektu zaměřeném na detekci korozních důlků na lopatkách nízkotlakých 200MW rotorů na klasických elektrárnách. Ve spolupráci s Výzkumným a zkušebním ústavem Plzeň s.r.o. jsme kvalifikovali metodu měření hloubky korozních důlků ramenovým skenerem a vytvořili metodiku pro monitorování stavu lopatek a jejich vývoje s dobou provozování [2]. Cílem těchto měření je identifikace lopatek postižených tímto degradačním mechanismem v dostatečném časovém předstihu a další monitorování těchto míst, případně je možno doporučit výměnu a minimalizovat tak nežádoucí finanční ztráty vlivem havárie a neúměrného prodloužování odstávek.



Obr. 2 Fotografie lopatky s korozními důlky  
Fig. 2 Photo of a blade with corrosion pitting

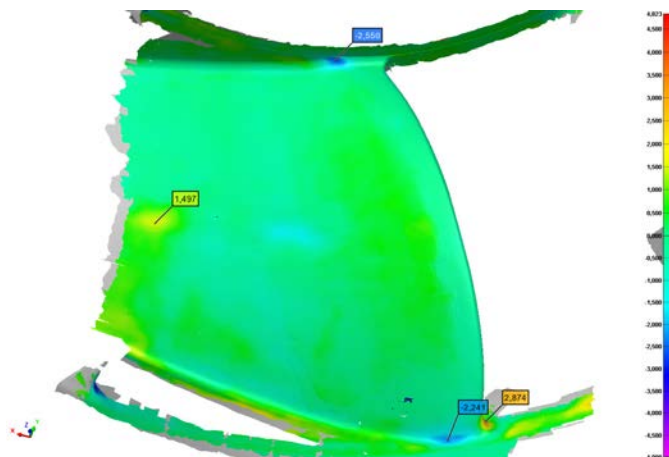
Pomocí 3D měření jsme schopni stanovit hloubku důlků, pokud přesahuje 50  $\mu\text{m}$ , změřit jejich šířku a přesnou pozici na lopatce. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. pak na základě naskenovaných dat hodnotí kritičnost jednotlivých důlků podle napěťové analýzy lopatek [3].



Obr. 3 Sken korozních důlků  
Fig. 3 Scan of corrosion pitting

Na projekt monitorování důlkové koroze navázal další výzkumný projekt CVŘ s.r.o. zabývající se skenováním lopat oběžných kol na vodních elektrárnách. Projekt byl zaměřen na hodnocení kavitací na lopkách Francisovy turbíny a sledování úbytků v kritických místech oběžného kola [4]. Na rozdíl od klasických elektráren nemá odstavení vodní turbíny zásadní dopad na celkovou životnost lopat kvůli rozdílným degradačním mechanismům. Rozvoj degradačních procesů na lopkách vodních turbín je tak možné sledovat v každoročních pravidelných odstávkách a podnikat včas opravy či jiná opatření. Při velkých úbytcích materiálu na lopkách je možné navařit materiál a dosáhnout tak původního tvaru dle CAD modelu nebo skenu nulového stavu

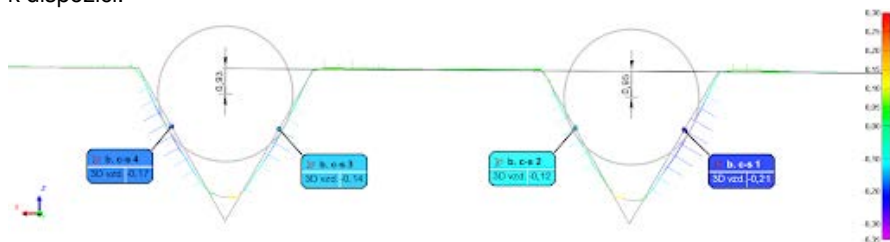
získaném skenováním před prvním spuštěním. Pro zjednodušení práce svářeče je možné vytvořit tvarovou šablonu na 3D tiskárně.



Obr. 4 Odchylky na lopatě Francisovy turbíny od ideálního tvaru  
Fig. 4 Deviations on the Francis turbine blade from the ideal shape

Oproti klasickým elektrárnám jsou v jaderné energetice kladeny obecně daleko větší požadavky na bezpečnost personálu i technologií. Kromě špatné přístupnosti a komplikovaného uchycení skeneru je zde navíc faktor radiace, který omezuje čas na provádění kontrol a všeobecná možnost kontaminace jak lidí, tak technologií.

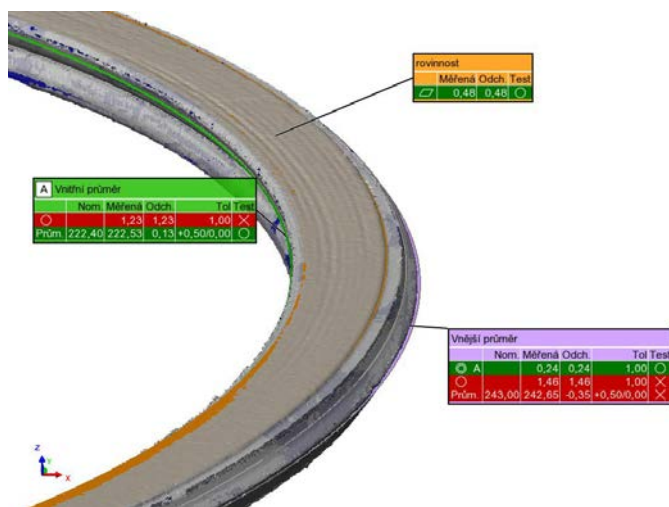
Na JE Temelín bylo ramenovým skenerem prováděno měření drážek těsnění hlavní dělicí roviny a víka reaktoru [5]. Na hlavním výrobním bloku č. 2 bylo měření provedeno letos podruhé a bylo tak možné sledovat vývoj otlaků po jednom roce provozu. Vyhodnocení probíhalo ve 27 řezech kolmých na drážku těsnění, kde je možné měřit odchylky od ideálního CAD modelu nebo proti datům z poslední odstávky, pokud jsou k dispozici.



Obr. 5 Řez drážkou hlavní dělicí roviny  
Fig. 5 Cross-section of the groove of the main dividing plane

Výhodou této metody je, že na rozdíl od současné bodové metody měření (kuličkou s úchylkoměrem) lze monitorovat celý profil drážky a zkoumat, kde přesně dochází k deformacím. Vyhodnocení dat z 3D skenování je díky sklonu, který svírají stěny drážek s hlavní dělicí rovinou, zatíženo 2× menší chybou zarovnání dělicí roviny než ruční měření. Při 3D měření je navíc získána informace o případných defektech po celé hlavní dělicí rovině, jejichž pozici a rozměry lze přesně odměřit.

Mezi další úlohy vhodné pro 3D měření patří hodnocení geometrie nově vyrobených komponent a jejich shody s výrobní dokumentací, dodržení tolerancí zásadních pro funkci zařízení a dodržení bezpečnosti jaderných zařízení. Kontrola geometrických tolerancí je často obtížná pro ruční měření mikrometry. Takto bylo měřeno dodané grafitové těsnění pro kompenzátor objemu JE Temelín s cílem zjistit, zda odpovídá požadavkům zákazníka na kruhovitosť a rovinnost. Na základě reportu z 3D měření bylo možné komponenty reklamovat. Navíc skenování již použitých těsnění pomohlo podle stupně deformace odhalit nerovnosti stykových ploch, které samotné nelze skenovat [6].



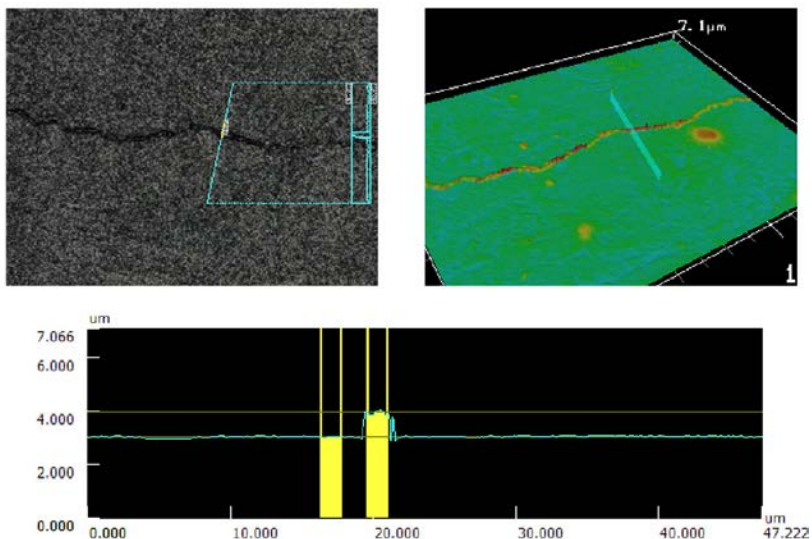
Obr. 6 Grafitové těsnění

Fig. 6 Graphite seal

Skenery dokáží zastat vizuální kontroly v místech, kam se člověk nedostane z důvodu vysoké radiace nebo nepřístupnosti. Pro měření malých defektů v nepřístupných místech používáme videoskop s možností 3D měření. Pomocí sond o průměru 6 mm a délce 3 m nebo 6 m je možné se dostat do velmi malých prostor, kde kromě klasické vizuální kontroly lze měřit rozměry a hloubku defektů.

Tento přístup nachází využití v bazénu vyhořelého paliva na reaktoru LVR-15 v Řeži, kde je nutné sledovat svary hliníkových plechů stínění na stěnách a stav armatur uvnitř bazénu. Za standardních podmínek je kontrola prováděna jednou za 5 let pomocí replikace povrchu, kdy je z bazénu vypuštěna voda. Pomocí videoskopu s 3D skenerem je možné provádět kontrolu každý rok a získat lepší přehled o stavu technologie. V tomto případě byla zkoumána i dávka, kterou je schopen kamerový systém vydržet. Maximální únosná dávka je omezena na 3 Gy a při vyšších dávkách dochází k již velmi výraznému zrnění obrazu, kdy už hodnocení není možné a dále k nevratnému poškození kamery.

Na závěr zmiňme použití optického profiloměru VKX 100 na principu laseru v kombinaci s optickými objektivy, určenými pro měření hloubkových profilů, lineární a plošné drsnosti. Profiloměr je vybaven motorizovaným stolkem a umožňuje skládání více snímků, čímž lze získat profil většího vzorku v detailním rozlišení. Tento profiloměr dosahuje přesnosti 5 nm, ale v praxi se dá využít pouze pro vzorky, které se vejdou pod mikroskop. V kombinaci s replikami povrchu lze ovšem kontrolovat i detaily velkých komponent. Replika dokáže přenést strukturu povrchu materiálu s přesností 0,1  $\mu\text{m}$ , což přináší velmi detailní možnosti zkoumání různých typů defektů typu trhlin, korozních důlků nebo tvarových odchylek.



Obr. 7 Měření hloubky trhliny na replice  
 Fig. 7 Depth measurement of a crack on the surface replica

### 3. Závěr

3D skenery jsou velkým přínosem pro energetiku, především pro hodnocení bezpečnosti komponent elektráren. Je pravděpodobné, že si v budoucnu získají ještě silnější pozici a časem najdou právoplatné místo i v rámci nedestruktivního testování. Nejdříve však bude nutné tuto metodu normalizovat jako ostatní defektoskopické metody.

Prezentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108.

#### Literatura

- [1] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P., HABRCETL, V. *Monitoring korozních důlků: Srovnání možností dostupných metod pro detekci a monitorování korozních důlků*. CVŘ PL-1148/0. Plzeň 2015.
- [2] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P., MATĚJÍČEK, J., HABRCETL, V. *Inspekční postup měření důlkové koroze na oběžných lopatkách*. CVŘ PL-1838/1. Plzeň 2017.
- [3] KASL, J., MATĚJOVÁ, M., MRŠTÍK, J. Failure of a Rotating Blade of a 200 MW Steam Turbine LP Rotor and Options for Eliminating other Similar Breakdowns. *Solid State Phenomena*, roč. 270, s. 174–182.
- [4] ZAHŘÁDKA, P., PATERA, J. *Protokol z měření lopat TG1 vodní elektrárny Dlouhé stráně*. CVŘ PL-1725/1. Plzeň 2017.
- [5] PATERA, J., ZAHŘÁDKA, P., MATĚJÍČEK, J. *3D skenování hlavní dělicí roviny a víka tlakové nádoby HVB 2*. CVŘ PL-2074/0. Plzeň 2018.
- [6] MATĚJÍČEK, J., ZAHŘÁDKA, P. *Protokol z měření těsnění DR HPV KO poz. 13 ventilu JE Temelín*. CVŘ PL-1967/0. Plzeň 2018.